

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA OBRÁBĚNÍ A MONTÁŽE

Faktory ovlivňující výrobu monolitních fréz broušením

Factors Influencing Monolithic Milling Cutters Manufacturing by Grinding

Student: Bc. Milan Kolařík
Vedoucí diplomové práce: prof. Dr. Ing. Josef Brychta

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Milan Kolařík**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Faktory ovlivňující výrobu monolitních fréz broušením**
Factors Influencing Monolithic Milling Cutters Manufacturing by Grinding

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika problému.
2. Broušení slinutého karbidu.
3. Parametry brousících kotoučů a broušení.
4. Diskuze experimentálních prací.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VASILKO, K.; BOKUČAVA, G. *Brúsenie kovových materiálov*. 1. vyd. Bratislava : Alfa, 1988. 235 s.
[2] VASILKO, K.; MICHEL, D.; HRUBEC, J. *Brúsenie a ostrenie rezných nástrojov*. 1. vyd. Bratislava : Alfa, 1984. 338 s.
[3] HAVRILA, M.; ZAJAC, J.; BRYCHTA, J.; JURKO, J. *Top trendy v obrábání, I. část – Obráběné materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 205 s. ISBN 80-968954-2-7.
[4] ZAJAC, J.; JURKO, J.; ČEP, R. *Top trendy v obrábání, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.
[5] MRKVICA, M. *Přípravky a obráběcí nástroje: I. díl, Řezné nástroje*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava. 2006. ISBN 80-7078-941-7.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr.Ing. Josef Brychta**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23.5.2011.....

Milan Poláček.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava má právo nevýdělečně ke své vnitřní diplomové práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23.5.2011.....



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Milan Kolařík

Adresa trvalého pobytu autora práce: ČSA 22, Šumperk, 787 01

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KOLAŘÍK, M. *Faktory ovlivňující výrobu monolitních fréz broušením : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011, 63 s. Vedoucí práce: Brychta, J.

Diplomová práce se zabývá faktory ovlivňujícími výrobu monolitních fréz broušením. Materiálem monolitních fréz byl slinutý karbid. V průběhu testovací výroby byl na základě zvolených parametrů sledován výrobní čas drážek pro odvod třísek (šroubovice nástroje) a celkový výrobní čas nástroje, vliv použitého pojiva brousícího kotouče na rychlost posuvu, hodnoty točivého momentu CNC brusky. Na vyrobených kusech fréz byla měřena drsnost povrchu. K výrobě byly použity diamantové brousící kotouče.

Dosažené výsledky jsem vyjádřil v sestrojených grafech a podrobněji popsal v jednotlivých kapitolách experimentální části a technicko-ekonomickém zhodnocení. Všechny potřebné údaje jsou uvedeny v příloze diplomové práce.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

KOLAŘÍK, M. *Factors Influencing Monolithic Milling Cutters Manufacturing by Grinding : Master Thesis*. Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2011, 63 p. Thesis head: Brychta, J.

This thesis deals with factors influencing production of monolithic milling cutters by grinding. The monolithic milling cutters were made of sintered carbide. In the course of trial production the following were monitored on the basis of chosen parameters: production time of chip removing grooves (tool helix) and the total production time of the tool, effects of the used bond of the grinding wheel on feed rate, and torque values of the CNC grinding machine. Surface roughness was measured on the produced pieces of the milling cutters. Diamond impregnated grinding wheels were used for the purposes of the production.

I drew graphs on the basis of the achieved results, and these results are described in detail in particular chapters of the experimental section and the technical and economic evaluation. All necessary data are attached to the thesis.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
ÚVOD.....	10
1 OBEČNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLÉMU	11
1.1 Historie firmy	11
1.2 Řešená problematika	12
2 BROUŠENÍ SLINUTÉHO KARBIDU	13
2.1 Technologie broušení	13
2.2 Proces mikrořezání.....	14
2.3 Tvorba třísky při broušení.....	15
2.4 Tepelné jevy při broušení.....	17
2.5 Síly v procesu broušení	18
2.6 Opotřebení broušicích kotoučů	19
2.7 Stav obrobeného povrchu po broušení.....	21
2.7.1 Drsnost povrchu.....	22
2.7.2 Kvalita povrchové vrstvy.....	24
2.8 Procesní média	25
2.9 Slinuté karbidy	26
2.9.1 Vlastnosti slinutých karbidů	26
2.9.2 Klasifikace slinutých karbidů	27
3 PARAMETRY BROUSICÍCH KOTOUČŮ A BROUŠENÍ.....	29
3.1 Druh brusiva.....	29
3.2 Tvar kotouče.....	30
3.3 Rozměr kotouče	31
3.4 Druh pojiva.....	31
3.5 Zrnitost brusiva	33
3.6 Koncentrace brusiva.....	33
3.7 Podmínky použití broušicích kotoučů.....	33
3.8 Hodnocení řezivosti broušicích kotoučů.....	35
4 DISKUZE EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ.....	37
4.1 Návrh testovací výroby	37
4.2 Testovací podmínky	37

4.2.1	Testovací zařízení	37
4.2.2	Testovací materiál	38
4.2.3	Brousicí kotouče	39
4.2.4	Řezné podmínky	42
4.3	Postup testovací výroby	43
4.4	Výsledky a vyhodnocení testovací výroby	44
4.4.1	Výrobní časy drážek pro odvod třísek	44
4.4.2	Celkové výrobní časy fréz	46
4.4.3	Změna posuvu v závislosti na zrnitosti a pojivu	49
4.4.4	Drsnost povrchu	50
4.4.5	Točivý moment	51
4.4.6	Chování brousicích kotoučů	52
5	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	53
5.1	Celková finanční náročnost testovací výroby	53
5.2	Produktivita výroby	54
5.2.1	Počet vyrobených kusů	55
5.2.2	Dosažený zisk	56
6	ZÁVĚR	58
	Seznam použité literatury	60
	Seznam příloh	62

Seznam použitých značek a symbolů

a°	Úhel nastavení podávacího kotouče	[°]
a_p	Hloubka řezu	[mm]
a_z	Tloušťka třísky odebíraná jedním zrnem brusiva	[μm]
BP	Bronzové pojivo	
CNC	Počítačem číslicově řízený stroj	
CVD	Chemické napařování z plynné fáze	
D	Průměr brousicího kotouče	[mm]
D1	1. typ diamantu	
D2	2. typ diamantu	
D3	3. typ diamantu	
DIA	Diamant	
E	Šířka upínací části kotouče	[mm]
E_a	Měrná práce broušení k opotřeбенí kotouče	[kJ·mm ⁻³]
E_m	Měrná práce broušení	[kJ·mm ⁻³]
FEPA	Sdružení evropských výrobců brusných kotoučů	
F_c	Tangenciální síla	[N]
F_f	Posuvná síla	[N]
F_p	Radiální síla	[N]
F'_c	Měrná tangenciální síla	[N·mm ⁻¹]
F'_p	Měrná radiální síla	[N·mm ⁻¹]
G	Brusný poměr	
H	Průměr upínacího otvoru v toleranci H6	[mm]
HP	Hybridní pojivo	
HRA	Tvrdost dle Rockwella	
HV	Tvrdost dle Vickerse	
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci	
J	Průměr vnější nosné části těla	[mm]
K	Koncentrace brusiva	[g·cm ⁻³]
K	Průměr vnitřní nosné části těla	[mm]
k	Součinitel úběru	
k_r	Součinitel řezivosti kotouče	[mm ³ ·N·min ⁻¹]

k_s	Součinitel samoostření	$[\text{mm}^3 \cdot \text{N} \cdot \text{min}^{-1}]$
k_p	Poměr tloušťky třísky a zaoblení zrna	
N_e	Skutečný měrný příkon broušení	$[\text{kW} \cdot \text{mm}^{-1}]$
PP	Pryskyřičné pojivo	
PVD	Fyzikální napařování	
P_K	Počet vyrobených kusů fréz	
p	Měrný řezný odpor	$[\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}]$
Q_a	Objem odbroušeného tvrdokovu	$[\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$
Q_m	Objem odbroušené vrstvy kotouče	$[\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$
R_a	Střední aritmetická drsnost	$[\mu\text{m}]$
R_m	Největší výška nerovností profilu	$[\mu\text{m}]$
R_z	Výška nerovností profilu z deseti bodů	$[\mu\text{m}]$
SK	Slinutý karbid	
S_p	Příčný posuv	$[\text{mm}]$
T	Celková výška broušícího kotouče/Šířka brusné vrstvy	$[\text{mm}]$
T_k	Trvanlivost kotouče	$[\text{min}]$
t	Hloubka třísky	$[\text{mm}]$
U	Výška brusné vrstvy	$[\text{mm}]$
v_b	Obvodová rychlost podávacího kotouče	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_k	Obvodová rychlost broušícího kotouče	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_o	Obvodová rychlost obrobku	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
v_p	Podélná rychlost obrobku (posuv)	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
v_z	Rychlost přísuvu	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
X	Výška brusné vrstvy/ Šířka brusné vrstvy	$[\text{mm}]$
γ	úhel čela	$[\circ]$
$\delta (\alpha+\beta)$	úhel řezu	$[\circ]$

ÚVOD

Ve své diplomové práci navazuji z části na práci bakalářskou, která se zabývala optimalizací broušení rychlořezné ocelí. Mohu tedy využít svých již získaných poznatků nejen v rámci školní výuky z oblasti broušení a materiálů.

Broušení bylo a i dnes je často považováno za ne příliš atraktivní oblast ve srovnání s ostatními metodami obrábění. Ovšem z hlediska historického vývoje se jedná o nejstarší z metod obrábění.

Úloha broušení v průmyslu má svoji opodstatněnou roli, kdy obrábění každé součástky je přímo či nepřímo spojeno s tímto procesem. Především ovšem broušení považujeme za dokončovací operaci při obrábění kovových a nekovových materiálů. Její role je častokrát nezastupitelná při určitých požadavcích na jakost povrchu. V posledních letech dostává zelenou broušení vysokými obvodovými rychlostmi [15]. Lze též broušení nazvat finální operací funkčních ploch. Vzhledem k uspořádání operace a podmínkám broušení se jedná o složitý proces. V důsledku stále se zvyšujících požadavků zákazníků na tvarově složitější, přesnější a produktivnější nástroje rostou i potřeby firem zabývajících se broušením a výrobou řezných nástrojů.

V zadaném tématu zabývající se výrobou monolitních fréz broušením podrobím hlubšímu zkoumání jednotlivé faktory mající vliv na produktivní a přesnou výrobu těchto nástrojů.

S ohledem k návaznosti na bakalářskou práci očekávám od práce ještě větší prohloubení poznatků z předchozích experimentálních zkoušek a měření. Výrazným pozitivem při vypracovávání diplomové práce je znalost prostředí firmy Urdiamant, s.r.o. a jejího výrobního sortimentu.

1 OBECNÁ CHARAKTERISTIKA PROBLÉMU

1.1 Historie firmy

Společnost Urdiamant s.r.o. Šumperk vznikla 1.7. 2000, kdy byla zapsána do obchodního rejstříku. Její tradice sahá až do roku 1933, kdy v Šumperku započala výroba nástrojů s diamantem a do dnešního dne se rozrostla na široký vyráběný sortiment. Základní dělení výrobků je udáváno dle použití na strojírenský, stavební a geologický. Všechno nářadí se vyrábí z nejkvalitnějších surovin a pro speciální technologické podmínky a tudíž má i nejširší spektrum použití. Kvalitu výroby a vývoje nářadí ve firmě potvrzuje i získání certifikátu ISO 9001 v prosinci 2000.

Hlavní historická data firmy

1933 – společnost Stellwag zahájila výrobu nástrojů s přírodním diamantem

1936 – registrace ochranné známky URDIAMANT

1952 – vznik závodu 1. pětiletky

1966 – vznik státního podniku PRAMET

1967 – syntéza umělého diamantu

1981 – vznik samostatného provozu výroby diamantových nástrojů

1989 – v rámci Prametu vznik Divize 6 – diamantové nástroje

2000 – vznik samostatné firmy URDIAMANT

2000 – získání certifikátu ISO 9001

2000 – vznik slovenské pobočky

2005 – vznik polské pobočky

Mezi vyráběný sortiment firmy patří *brousící kotouče z diamantu a kubického nitridu boru pro strojírenství* (široký sortiment FEPA standardu), *diamantové nástroje pro opracování skla* (hladinové kotouče, kotouče pro broušení hran, kotouče pro broušení dekoru), *diamantové nástroje* (orovnávače, vnikací tělesa, diamantové pilníky, pasty, prášky, diamantové průvlaky), *diamantové vrtací nástroje* (vsazované a impregnované korunky, korunky a dláta s PKD prvky, úzkobřité stavební korunky), *Diamantové nástroje pro stavebnictví a kamenoprůmysl* (řezací a brousící kotouče) [8].

1.2 Řešená problematika

Úlohou mé diplomové práce bylo proměřit a poukázat na faktory ovlivňující výrobu monolitních fréz broušením. Zvláště pak se zaměřením na nejnáročnější operaci jakou je výroba drážky pro odvod třísek tzv. šroubovice nástroje. Jednalo se o vliv zvolených parametrů brusných kotoučů na výsledné výrobní časy a celkovou kvalitu vyrobené frézy splňující potřebné technologické požadavky.

Téma práce bylo řešeno ve firmě Urdiamant, s.r.o. v Šumperku, která poskytla testovací zařízení CNC brusku Walter Helitronic Mini Power, diamantové brousící kotouče typu 1A1 určené pro vybrušování drážky ve šroubovici, dále pak také kotouče 11V9 a 12V9 potřebné pro zhotovení ostatních ploch frézovacího nástroje, dodány byly tyčové polotovary \varnothing 10, 14, 20 mm v toleranci h5 jejichž materiálem byl slinutý karbid. Při výrobě fréz byly zadány vstupní parametry broušení (obvodová rychlost a posuv) a parametry brousících kotoučů (typ diamantu, pojivo, zrnitost, koncentrace). Některé z těchto parametrů poté byly v průběhu testovací výroby měněny.

Před samotným testováním jsem na základě dostupné literatury uvedl teoretické poznatky týkající se procesu broušení, broušení slinutého karbidu, základní informace o slinutém karbidu a diamantových kotoučích.

Poznatky získané během testovací výroby jsem zanesl do grafů, tabulek a doložil i fotodokumentací v experimentální části práce.

2 BROUŠENÍ SLINUTÉHO KARBIDU

2.1 Technologie broušení

Broušení je rychlostní mikrořezání (odírání) povrchových vrstev těles velmi jemnými zrny brusiva, stmelenými pojivem v nástroj. Proces broušení probíhá nejčastěji při rychlostech do $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Výjimkou nejsou ovšem ani rychlosti až do $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Při broušení vniká do obráběného materiálu řezný klín a odděluje z něj třísky nepravidelnými mnohoklínovými nástroji se speciální strukturou [1]. To jej řadí do skupiny abrazivních metod obrábění.

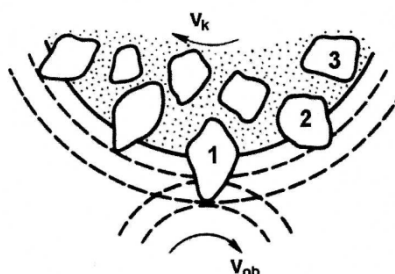
Podle typu brousícího nástroje se rozlišují tyto druhy broušení:

1. vázaným pevným brusivem: zrna brusiva stmelená pojivem do tvaru nástroje
2. volným brusivem: zrna jsou ve formě prášku pro broušení kapalinou, ultrazvukem nebo jiným podobným způsobem obrábění tvrdých materiálů.

Brusná zrna jsou na pracovní ploše brousícího nástroje neuspořádaně rozložena. Jejich rozmístění vytváří přerušovaný břit s různou či větší výškou zrn.

Vrcholy zrn u kotouče mají vždy různou radiální vzdálenost od ideální válcové plochy, což působí při broušení jejich různé zatížení. Může také nastat případ, kdy třísku odebírá současně několik dílčích břitů jednoho zrna.

Všechna zrna kotouče nemohou být rovnoměrně zatížena, protože jsou různě vysoká. Nejvíce zatížená jsou zrna vystupující nad ideální válcový povrch, zatímco ostatní snížená zrna určitou dobu nepracují (obr. 1). Tato zrna začínají působit pouze po přirozeném opotřebování aktivních zrn nebo po orovnání kotouče [4].



Obr. 1 Zrna brousícího kotouče [4]

1 – řezná, 2 - tlačná, 3 – pasivní

2.2 Proces mikrořezání

Při popisu mikrořezání vycházíme z geometrických parametrů brusných zrn, jejichž tvar je nepravidelný se zaoblenými vrcholy, které mají záporný úhel čela.

Při odebírání jednotlivých třísek zrnem brousícího kotouče dochází ke kluzu zrna po povrchu obráběného kovu a k posunu (usmýknutí) částice kovu. Na počátku záběru zrno klouže a vzniká pružně plastická deformace otláčování kovu zrnem. Současně roste tloušťka vrstvy kovu, připadající na zrno, a zvětšují se síly působící na zrno. Částice kovu se začíná posouvat (usmykávat) v určitém bodě, když řezná síla působící na vrstvu čelem zrna dosáhne takové velikosti, že již stačí částici posunout. Odebírání třísky zrnem závisí na vzájemném poměru mezi délkou kluzu a řezu při záběru na skutečném řezném úhlu daném poměrem tloušťky odebírané třísky k poloměru zaoblení vrcholu brusného zrna:

$$k_{\rho} = \frac{a_z}{\rho_z} \sim 0,5 \quad (1)$$

Pro hodnoty k_{ρ} platí:

1. při $k_{\rho} < 0,5$ a velkých záporných úhlech čela zrn brusiva dochází k silné plastické deformaci kovu nebo dokonce ke kluzu zrn po kovu,
2. při $k_{\rho} \sim 0,5$ je možný vznik třísek mikrořezáním, zvyšuje-li se plasticita kovu v důsledku zvýšení řezné rychlosti,
3. při $k_{\rho} > 0,5$ probíhá hlavně mikrořezání, a při $k_{\rho} \sim 1,0$ dochází k mikrořezání ve všech případech.

Podíl procesu mikrořezání při broušení se snižuje podle míry otupení brousícího kotouče, opotřebení zrna a zmenšení a_z/ρ_z , a podíl kluzného tření roste.

Povrch krystalu brusiva má vždy určitou drsnost, kterou způsobuje jeho vnitřní nedokonalost nebo podmínky jeho vzniku. Vůbec největší drsnost mají běžné syntetické diamanty. Uvedené nedokonalosti v procesu mikrořezání ještě vzrůstají. Výčnělky M a N zrna mají funkci samostatných dílčích břitů, které odebírají třísky 10krát až 100krát tenčí než hlavní břit zrna.

V důsledku zaoblení břitu bude v určitém bodě X skutečný úhel čela:

$$\gamma_X = \arcsin \frac{\rho_z - a_X}{\rho_z} \quad (2)$$

Skutečný úhel řezu v bodě X bude:

$$\delta_X = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{\rho_z - a_X}{\rho_z} \quad (3)$$

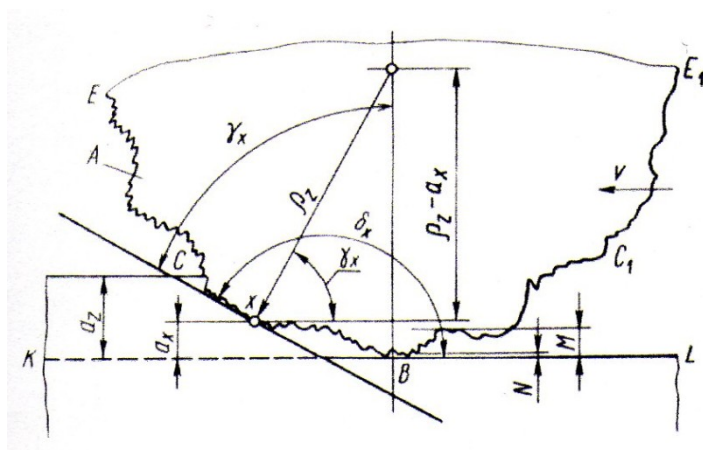
a_x – tloušťka ubírané vrstvy v bodě X

ρ_z - poloměr zaoblení břitu

Tupý úhel způsobuje:

1. zvýšený odpor proti kluzu jednotlivých elementů třísky, vyvolávaný větším třením ve střížné rovině
2. vzrůst vnějšího tření mezi nástrojem a obráběným kovem.

Z rovnice (3) vyplývá, že při $\alpha_X \rightarrow 0, \delta_X \rightarrow 180^\circ$, čili že pro vrstvy materiálu bezprostředně u obrobené plochy dosahuje úhel řezu takové hodnoty, při níž již řezání není možné a kov se začíná omačkávat [4].



Obr. 2 Schéma brousícího zrna [4]

ECB – plocha čela, BC₁E₁ – hřbetní plocha, M – mikrovýstupek,

N – submikrovýstupek, KL – přímka řezu

2.3 Tvorba třísky při broušení

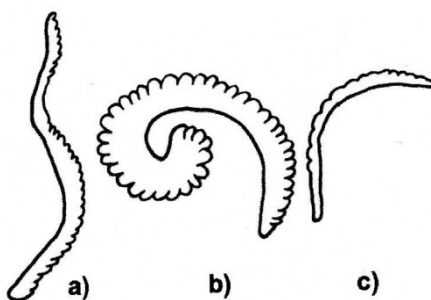
Při tvoření třísky nás zajímá plastická deformace, která se vyskytuje jen v mezích malých objemů materiálu a to v místech největšího napětí. Plastická deformace je při řezání dovedena až do stádia rozrušení, kdy se od základního materiálu oddělí částičky ve formě třísky.

Oddělení částeczek materiálu ve formě třísky se dle stavu materiálu může uskutečnit:

- a) odtrhnutím, když v zóně řezání převládají normálové tahové napětí
- b) odstřihnutím, když v zóně řezání převládají tangenciální smyková napětí [1].

Nepravidelné rozložení zrn brusiva na pracovní ploše kotouče způsobuje různou konfiguraci a rozměry třísek vrstev odebíraných jednotlivými zrny. Pro určitý brousící kotouč závisí tvar a rozměry třísek na řezných podmínkách. Pokud se např. zvětší obvodová rychlost obrobku při stálé obvodové rychlosti kotouče, zvýší se posuv na zrno a tříska bude přecházet za zavinutého na segmentovitý tvar (obr. 3). Nejčastěji se vyskytuje páskovitá tříska, jejíž tloušťka se postupně zvětšuje. Odebíraná vrstva materiálu se při mikrořezání vždy pěchuje, a proto se tvar skutečné třísky podstatně liší od jejího teoretického tvaru. Tříska ubíraná v procesu broušení se zachycuje v prostoru mezi zrny brusiva a vypadává, když se dostane mimo styčnou plochu kotouče obrobku. Jestliže je prostor mezi jednotlivými zrny nedostatečně velký, může být tříska mezi zrna vtlačena tak, že ji nedokáže proud procesní kapaliny od kotouče oddělit. Odpad, který vzniká během procesu broušení, obsahuje kromě třísek i rozmělněné pojivo společně s drobnými částicemi rozdrčeného brusiva. Broušení slinutého karbidu diamantovým kotoučem se tvoří článkovitá tříska s velmi slabě spojenými články.

Při broušení kovů s vysokou pevností vznikají i jiskry, což jsou velmi drobné roztavené částice kovů odletující z místa styku obrobku s kotoučem. Jiskry mají svůj tvar, barvu i délku dráhy apod.



Obr. 3 Druhy třísek vznikající při broušení [4]

a – páskovitá, b – zavinutá, c – segmentovitá

Na proces broušení má značný vliv veličina a_z , což je tloušťka třísky odebíraná jedním zrnem brusiva. Na tloušťce třísky závisí otupení zrn (trvanlivost kotouče), řezná síla připadající na jedno zrno, drsnost broušené plochy, okamžitá teplota v místě působení zrna apod. Zvětší-li se a_z pronikají zrna do obráběného materiálu hlouběji a zrna i pojivo

se intenzivněji opotřebovávají. Se změnou a_z se mění i pracovní režim kotouče a podmínky broušení [4].

2.4 Tepelné jevy při broušení

V procesu mikrořezání se vytváří v povrchové vrstvě obrobku při broušení velký počet míst s vysokými teplotami, jejichž působením se povrchová vrstva intenzivně zahřívá [4].

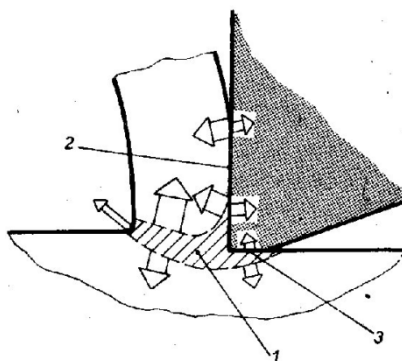
Každý zdroj tepla má svou bezprostřední oblast účinku. Teplo z oblasti prvotní deformace se odvádí převážně třískou a menší část obrobkem; teplo z oblasti druhotné deformace se odvádí převážně třískou a malá část nástrojem; teplo z oblasti dotyku hřbetu nástroje s obrobkem se odvádí převážně obrobkem a menší část nástrojem [1].

Při broušení rozlišujeme (vzniká):

1. okamžitou teplotu, která se vyvíjí přímo v místě záběru zrna brusiva; dosahuje vysokých hodnot po krátkou dobu;
2. stykovou teplotu v oblasti styku kotouče a obrobku (v místě broušení);
3. střední teplotu – ustálenou teplotu na povrchu broušeného obrobku.

Při broušení diamantem jsou teploty, které jsem zde zmínil zpravidla nižší, což je vysvětleno relativně nevelkým rozsahem a nízkým stupněm plastické deformace obráběného materiálu v důsledku menších zatížení diamantových zrn - jejich větší tvrdostí a tuhostí. Dále pak relativně nižším součinitelem tření, což způsobuje zmenšení sil a práce tření. V neposlední řadě i větší tepelnou vodivostí diamantu v porovnání s normálním brusivem.

Vznik a rozdělení tepla vznikajícího během broušení je závislé na všech podmínkách broušení: na typu kotouče, řezných podmínkách, mechanických a fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, vlastnostech procesního média atd [4].

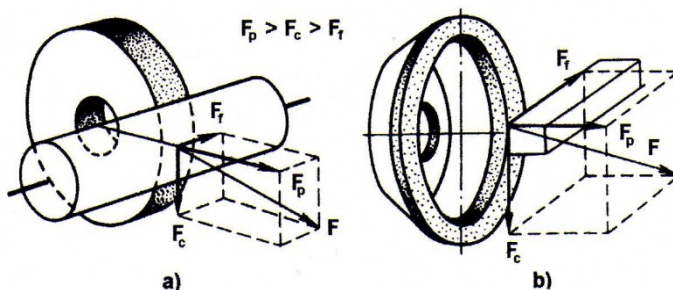


Obr. 4 Místa vzniku tepla 1, 2, 3 a cesty odvádění tepla při řezání [1]

2.5 Síly v procesu broušení

Celková síla broušení vzniká vzájemným působením pracovní plochy brousícího nástroje a obrobku. Břity zrn ubírají velmi drobné třísky, kterým odpovídají elementární řezné síly. Celkové síly broušení mohou dosáhnout značné velikosti, protože při broušení pracuje současně velké množství zrn.

Celková síla broušení se skládá z *radiální složky síly* F_p , *tangenciální složky síly* F_c a *posuvné síly* F_f (obr. 5).



Obr. 5 Celková síla broušení a její složky [4]

a) vnějších rotačních ploch obvodem kotouče, b) rovinném broušení čelem kotouče

Elementární síla F_c způsobuje odřezávání třísky a elementární síla F_p přitlačuje brusné zrna k obráběné ploše. Pokud jsou na zrnech záporné úhly čela, síla F_p je vždy větší než síla F_c . Experimentální měření potvrzují že $F_p/F_c = 1,0$ až $3,0$. Síla F_f je o mnoho menší jako síla F_c .

Při zvětšení celkové síly broušení se kotouč více opotřebovává a zkracuje se doba jeho trvanlivosti, zvyšuje se teplota v zóně broušení i na povrchu obrobku, snižuje se přesnost broušení i kvalita broušeného povrchu.

Velikost celkové síly broušení ovlivňují řezné parametry, ale i charakteristika kotouče. Všeobecně lze říci, že roste se snižováním obvodové rychlosti kotouče v_k a snižováním zrnitosti a koncentrace kotouče. Celková síla broušení roste se zvyšováním: hloubky řezu a_p , obvodové rychlosti obrobku v_0 (při broušení válcových ploch) nebo posuvové rychlosti v_p (při rovinném broušení) [4].

Specifické jsou i silové závislosti při broušení diamantem, což lze vysvětlit fyzikálními vlastnostmi diamantových zrn. Ty mají 3x větší mikrotvrdost, 4x až 5x vyšší mez pevnosti v ohybu a 10x větší součinitel tepelné vodivosti než zrna karbidu křemíku. Při broušení SK diamantovými kotouči, kdy pojivem je umělá pryskyřice jsou síly 4x až 5x menší než síly, které vznikají při broušení kotouči ze zeleného karbidu křemíku.

Na základě již dříve provedených experimentálních měření se došlo k některým výsledkům a závěrům osvětlující vliv základních parametrů na síly při broušení diamantem.

Například, aby se zmenšila celková síla broušení, je vhodnější pracovat s většími příčnými posuvy při stejném podélném posuvu.

Zvýšením koncentrace diamantových zrn se snižují, jak radiální tak i tangenciální složky řezné síly. V tomto případě se tento vliv nejvíce projevuje při nižších koncentracích do 100%.

Zvýší-li se koncentrace zrn a řezná síla dojde k nárůstu produktivity broušení diamantem. U obrobků ze SK patřící do skupiny K se celková síla broušení zvětšuje s růstem obsahu kobaltu [4].

2.6 Opotřebení brousicích kotoučů

Opotřebení pracovní plochy brousicího kotouče je složitý fyzikálně-chemický proces, jehož průběh závisí na podmínkách broušení: charakteristice kotouče, vlastnostech obráběného materiálu, řezných podmínkách atd. Podle vlastností brousicích kotoučů (tvrdosti, druhu pojiva, brusiva atd.) a podle řezných podmínek probíhá při broušení buď otupení kotouče, nebo se uplatňuje jeho samoostření.

Otupení kotouče nastává v důsledku vytrhávání nevhodně položených zrn brusiva a jejich postupným štěpením a zaoblováním, takže zrna ztrácejí řezivost.

Samoostření brousícího kotouče probíhá v důsledku postupujícího otupování zrn brusiva, která jsou vzrůstajícím řezným odporem vylamována (celá nebo jen jejich části) z pojiva. Po vydrolení pojiva pak začínají pracovat nová zrna, takže se pracovní plocha kotouče neustále obnovuje. Tato schopnost obnovování řezné plochy se odborně nazývá samoorovnávaní a je význačnou specifickou vlastností brousících kotoučů.

Řezná část brousícího zrna se může v závislosti od zatížení podrobit plastické deformaci či křehkému lomu. Další broušení takto porušeným nástrojem je nemožné; nástroj je třeba opravit.

Plastická deformace brousícího materiálu vychází z funkční závislosti tvrdosti na teplotě. Se zvyšující se teplotou dochází ke zvyšování i jeho plasticity, a tím se snižuje i jeho tvrdost.

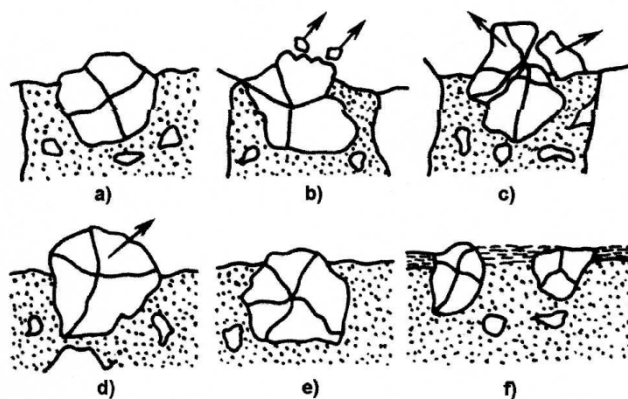
Křehký lom řezné části zrna nastává tehdy, když v něm maximální tahové napětí dosáhne meze pevnosti v tahu.

Z fyzikálně-chemického hlediska rozlišujeme tyto způsoby opotřebení:

- *adhezní*: charakteristickým znakem jsou mikroskopické důlky, které vznikají na povrchu zrna. Jsou dokladem odtrhnutí nebo odříznutí jeho částí
- *abrazivní*: vzniká tehdy, když tvrdé částice obráběného materiálu nebo oddělené částice brousícího materiálu vnikají do stykových ploch nástroje a působí jako mikroskopické nože
- *difuzní*: vzniká, pokud je mezi brusivem a materiálem obrobku chemická příbuznost
- *oxidační*: vzniká při vysokých teplotách řezání, které se vytváří v procesu broušení, doprovázené intenzivním okysličováním brousícího materiálu.

Těmto způsobům opotřebení odpovídají dle podmínek obrábění tyto mechanismy opotřebení brusných zrn (obr. 6):

- a) *otěr řezných částí* (vrcholů) zrn brusiva se vznikem více či méně hladkých plošek
- b) *mikroskopické porušování* (štěpení) zrn – s oddělováním malých úlomků
- c) *porušování celých zrn* – s oddělováním celých částí zrna
- d) *úplné vylamování zrn z pojiva*
- e) *porušení působením chemických vlivů* ve styčném pásmu zrna a obráběného materiálu při vysokých teplotách vznikajících v zóně broušení
- f) *zanášení* prostoru mezi zrny (pórů) třískami a brusným odpadem



Obr. 6 Základní způsoby opotřebení brousícího kotouče [4]

Podle podmínek broušení může kotouč vykazovat několik druhů opotřebení současně nebo některý z nich převládá. Způsoby a) a b) opotřebení jsou typické pro nástroj, který pracuje v oblasti s omezenou nebo vůbec žádnou schopností samoostření [4].

Zrna syntetického diamantu se častokrát opotřebovávají křehkým lomem. Pokud obráběný materiál obsahuje karbidy má opotřebení zrn charakter abrazivní. Brusivo z přírodního diamantu má oproti brusivu z umělého diamantu větší odolnost proti opotřebení. V procesu broušení SK diamantem je výhodnější použít brusivo z umělého diamantu, z důvodu jeho větší výkonnosti, jelikož zrna syntetického diamantu jsou v pojivu lépe upevněna. Jejich mikroporušování a samoostření je intenzivnější [4].

2.7 Stav obrobeného povrchu po broušení

Při výrobě strojních součástí je nutností vedle jejich přesných rozměrů dbát na vhodnou jakost povrchu. Drsnost povrchu má značný význam a je charakterizována mikronerovnostmi. Skutečný povrch součásti se liší od ideálního. Na skutečném povrchu jsou zřejmé velmi jemné nerovnosti rozložené přibližně pravidelně po celé ploše.

2.7.1 Drsnost povrchu

Na výrobních výkresech je drsnost povrchu definována značkou R_a . V ČR je nejběžnější metodou pro hodnocení drsnosti povrchu stanovení střední aritmetické úchylky profilu R_a .

Do drsnosti nelze započítávat vady povrchu např. náhodné nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují jen ojediněle (rysky, trhliny, důlky apod.) a které vznikají vadami materiálu, poškozením aj. Dle převládajícího směru nerovností drsnost posuzujeme v příčném nebo podélném směru. Parametry drsností vyhodnocujeme na skutečných profilech, které se získávají jako průsečnice kolmé či šikmé roviny se skutečným povrchem. Nejčastěji tedy používanou metodou je již zmíněný systém střední čáry.

Střední čára profilu m má tvar geometrického povrchu (přímky, kružnice, evolventy atd.). Je paralelní s hlavním směrem profilu a rozděluje zjištěný povrch tak, že v rozsahu základní délky je součet čtverců úchylek tohoto profilu od střední čáry m minimální. V grafickém záznamu povrchu profilu se střední čára prokládá tak, aby součty ploch po obou jejích stranách byly v rozsahu základní délky l stejné [1].

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (4)$$

Mezi další využívané metody určení drsnosti patří:

- největší výška nerovností profilu R_m

R_m je vzdálenost mezi čarou výstupku profilu a čarou prohlubně v rozsahu základní délky l .

$$R_m = |y_{rmax}| + |y_{pmax}| \quad (5)$$

- výška nerovností profilu z deseti bodů R_z

R_z je střední hodnota absolutních hodnot výšek pěti největších výstupků a pěti nejnižších prohlubní profilu v rozsahu základní délky l .

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{rmi}|}{5} \quad (6)$$

Drsnost povrchu příznivě ovlivňuje vysoká obvodová rychlost brousícího kotouče. Při zvýšení obvodové rychlosti kotouče se drsnost broušeného povrchu podstatně snižuje.

Je to způsobeno jak zmenšením tloušťky třísky odebírané jedním zrnem kotouče, tak růstem tepla v řezném pásmu každého zrna.

Čím vyšší je obvodová rychlost obrobku, podélný a příčný posuv, tím větší je drsnost broušeného povrchu. Uvedený vliv se vysvětluje tím, že při zvětšení posuvů se zvětšuje tloušťka třísky odebírané jednotlivým zrnem brusiva a zrna pronikají hlouběji do povrchové vrstvy obrobku.

Zvětšíme-li podstatně průměr brousícího kotouče při jeho stálé obvodové rychlosti, sníží se drsnost obráběného povrchu, neboť se prodlužuje stykový oblouk kotouče a obrobku a zmenšuje se tloušťka třísky odebírané jedním zrnem. Zvětší-li se šířka kotouče při konstantním podélném posuvu, drsnost broušeného povrchu se poněkud zlepšuje.

Drsnost povrchu je značně ovlivněna zrnitostí brousícího kotouče a počtem zdvihů při broušení na čisto. Použijeme-li kotouč s jemnější zrnitostí, má obrobená plocha při ostatních stejných podmínkách vždy nižší drsnost. Zrnitost ovlivňuje při vysokých řezných rychlostech drsnost broušené plochy nepodstatně, neboť brousící kotouč se s určitým úsekem obrobku setkává velmi často [4].

Broušení diamantem a jeho vliv na drsnost povrchu je znatelný v podstatném zlepšení kvality broušení, jelikož tloušťky třísek odebíraných zrnem brusiva, síly a teploty jsou nižší v porovnání s běžným broušením. Pakliže je broušený materiál tvrdší, dochází k snižování drsnosti povrchu, což je způsobeno tím, že zrna diamantu pronikají méně hluboko do obráběného materiálu. Z hlediska mikronerovnosti je ovlivňujícím prvek pojivo. Diamantové kotouče s pojivem z umělé pryskyřice se vyznačují vyšší kvalitou povrchu po broušení než kotouče s kovovým či keramickým pojivem. Pojivo z umělé pryskyřice, které je naneseno na kotouče má samoostřicí účinek a tzv. hladící účinek, způsobující snižování drsnosti broušené plochy.

Na kvalitu povrchu má vliv zrnitost a koncentrace diamantových zrn. Větší diamantová zrna s nižší koncentrací zvětšují průřez jednotlivých třísek a tím i drsnost povrchu. Zvětšuje-li se koncentrace u jemnozrnných kotoučů, dochází ke zvětšování drsnosti povrchu. Kdežto u diamantových kotoučů hrubozrnných se drsnost povrchu se zvyšováním koncentrace snižuje, jelikož na jednotce pracovní plochy kotouče je více řezných diamantových zrn a mikronerovnosti se tím snižují [4].

2.7.2 Kvalita povrchové vrstvy

Při broušení, stejně jako i při jiných druzích obrábění, vzniká plastická deformace povrchové vrstvy obrobené plochy. Spolu s plastickou deformací je tato vrstva vystavena i účinkům tepla.

Povrchová vrstva při zahřívání zvětšuje svůj objem. Níže položené chladné vrstvy se tomu brání, v důsledku toho vznikají v rozehráté povrchové vrstvě tlakové napětí. Vysoká plasticita rozehráté povrchové vrstvy zapříčiňuje v této vrstvě plastickou deformaci, která odstraňuje vnitřní tlaková napětí. Ochladnutí povrchové vrstvy vyvolává zmenšení objemu kovu této vrstvy. Stlačení povrchové vrstvy však zabraňuje studený kov ve středu součástky. V povrchové vrstvě vznikají proto zbytková tahová napětí a pod touto vrstvou tlaková napětí. Vyrovnání teploty nevyvolává ztrátu těchto napětí, proto omezená plasticita kovu při pokojové teplotě vylučuje průběh místní plastické deformace povrchové vrstvy, která by odstranila vnitřní napětí [2].

Při broušení ocelí vznikají značné teploty, které jsou často vyšší než překrystalizační teplota odpovídající teplotě A_{c3} . Probíhají strukturní změny, které doprovází změna napjatosti v povrchové vrstvě. Převyšuje-li napětí vznikající v důsledku těchto změn pevnost materiálu v příslušném místě, vznikne trhлина [4].

U slinutého karbidu nedochází při broušení diamantem ke strukturním změnám, což je vysvětlováno tím, že při tomto způsobu obrábění dochází ke vzniku malých měrných řezných sil a teploty. Toto vše bylo prokázáno při analýze povrchové vrstvy za pomoci rentgenového záření. Též dochází při broušení SK diamantovými kotouči ke vzniku zbytkových napětí, která jsou vyvolána společným působením mechanického a teplotního činitele. V příkladě broušení wolfram-kobaltových SK diamantem je značný vznik zbytkových napětí v tlaku v povrchové vrstvě, jak v kobaltové tak i v karbidové fázi, což je důkazem rozhodujícího vlivu mechanického činitele při jejich vytváření. Tepelná tahová napětí zmenšují absolutní hodnotu tlakových zbytkových pnutí. Pakliže volím podmínky broušení, při kterých rostou tepelná tahová napětí, velikost zbytkových napětí v tlaku se zmenšuje. Se zvýšením obsahu kobaltu ve slinutém karbidu tyto napětí rostou. I zvýšená koncentrace diamantové brusiva má vliv na zbytková napětí v povrchových vrstvách. Se zvýšením od 100 do 200% se tato napětí v tahu sníží a vzrostou napětí v tlaku [4].

2.8 Procesní média

Důležitou složkou operace broušení je použití procesního média. Tyto tekutiny kromě chladicího účinku, kdy podstatně snižují tření mezi kotoučem a obrobkem, taktéž dokonale odvádí odbroušený materiál (snižování náchylnosti k zanášení, pálení a chvění), dále jako základní požadavky očekávají dobrý masticí účinek a vysoká ochrana proti korozi. Dalšími z požadavků jsou zajištění ekonomického a efektivního provozu, stability brousící operace a ochranu životního prostředí. Tudíž kapalina by neměla mít negativní vliv na životní prostředí, ale taktéž na zdraví člověka.

V principu mohou existovat dva tepelné režimy, kdy v prvním se zrno za jednu otáčku kotouče stačí ochladit a v druhém, kdy se zrno nestačí ochladit a teplo se akumuluje. Druhý režim není žádoucí, jelikož může vést k postupnému ohřevu společně se změknutím kontaktních vrstev zrn a v konečném důsledku k prudké ztrátě řezivosti kotouče [9].

Na brusné operace jsou vhodné polosyntetické procesní kapaliny, které mají malý obsah minerálního oleje (cca do 20%) resp. syntetické vodou ředitelné procesní kapaliny. Procesní média s vyšším obsahem minerálního oleje postupně zanáší brusný kotouč. V důsledku toho dochází ke zhoršení kvality broušeného povrchu. Je dále zapotřebí častěji ořezávat brusný kotouč, což má přímý vliv na náklady spojené s jeho častější výměnou, stejně jako s častějšími prostoji stroje.

Při porovnání polosyntetických a syntetických procesních kapalin v praxi se jednoznačně ukázalo, že na brusné operace jsou nejvhodnější právě syntetické procesní kapaliny. K jejich přednostem patří *malá náchylnost na tvorbu bakterií, vynikající vyplachovací vlastnosti, čirost umožňující lepší sledování broušeného povrchu, lepší protikorozi vlastnosti.*

Jedinou z nevýhod syntetických procesních kapalin je jejich vyšší cena. Tento faktor redukuje jejich použití na skutečně velmi náročné a precizní brousící operace.

Životnost procesních médií výraznou měrou ovlivňuje její filtrace. Pro broušení je nejvhodnější hrubá filtrace magnetickým filtrem, jemná filtrace použitím filtračního papíru s propustností do 10 μm [6].

2.9 Slinuté karbidy

Slinutý karbid (SK) je dvousložkový či vícesložkový materiál tvořený tvrdými karbidovými částicemi v kovové vazbě. Vyrábí se práškovou metalurgií tzv. spékáním, kdy se nedosáhne teploty tavení všech složek. Lze tak tedy slinuté karbidy charakterizovat tím, že jsou to pevně spojené směsi prášků velmi tvrdých karbidů kovu s vysokým bodem tavení.

Slinuté karbidy jsou složeny z těchto druhů karbidů společně s pojivem, kterým je kobalt: karbid wolframu (WC), karbid titanu (TiC), karbid tantalu (TaC), karbid niobu (NbC), karbid chromu (Cr_3C_2), karbid vanadu (VC).

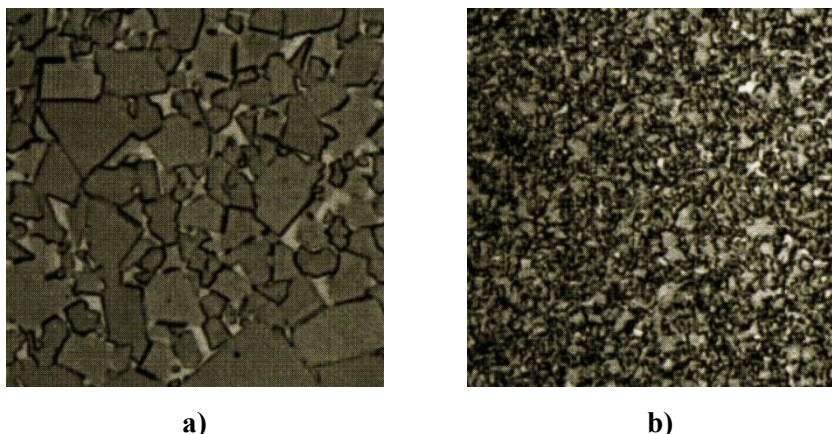
Obsah kobaltu ovlivňuje prakticky všechny fyzikální i mechanické vlastnosti jednotlivých slinutých karbidů. V aplikacích pro řezné nástroje se obsah kobaltu pohybuje v rozmezí 2÷13%. Kobalt jako pojivo umožňuje spékání tím, že se při ohřívání taví, přičemž rozpouští v sebe část karbidů a tvoří tak s nimi taveninu, která má nižší teplotu tavení než je teplota tavení pojiva. Po následním ochlazení vytvoří pevnou spojitou hmotu. Ta obklopuje tvrdé částičky základního substrátu (složky).

Každá ze složek má jiné fyzikální a mechanické vlastnosti. Pokud dojde k vzájemné změně chemického složení, dochází tak i ke změně vlastností slinutého karbidu. Vliv na změnu vlastností slinutých karbidů má i technologie jejich výroby [10].

2.9.1 Vlastnosti slinutých karbidů

Vlastnosti slinutých karbidů jsou ovlivněny nejen chemickým složením, jak jsem již zmínil v předchozích řádcích, ale i druhem a velikostí částic. Zvláště zrnitostí materiálu, druhem a množstvím pojiva, velikostí a množstvím strukturních defektů (pórovitost), kvalitou procesu výroby a vstupních surovin.

Dle velikosti zrna se třídí slinuté karbidy (obr. 7) na *hrubé* (okolo 7,5 μm), *střední* (průměrně 2,8 μm), *jemné* (okolo 1,5 μm). Jemnozrnné druhy, které mají zrnitost pod 1 μm , se dále dělí na: jemné, ultrajemné a někdy na tzv. superjemné (pod 0,4 μm) – v tomto případě se již jedná o nanokrystalický slinutý karbid [10].



Obr. 7 Struktura slinutého karbidu: a) hrubozrnný, b) jemnozrnný [10]

Mezi základní vlastnosti slinutých karbidů patří vysoká tvrdost 90 - 95 HRA, přičemž tvrdost klesá se stoupajícím obsahem Co. Mají nízkou pevnost v ohybu (900 – 1 900 MPa). Odolnost proti opotřebení do vysokých teplot 700 – 900 °C. Dobré mechanické a fyzikální vlastnosti (pevnost v tlaku a tahu) [10].

Nelze opomenout i vysoký modul pružnosti (již z dřívějších provedených měření vyšel závěr, že při stejném zatížení vykazuje ocel 2x až 3x větší průhyb než slinutý karbid) [5]. Další vlastností je odolnost proti korozi, ale malá tepelná a elektrická vodivost.

U materiálu jakým je SK je možnost jeho povlakování. Současný a uznávaný trend je takový, že povlakovaný nástroj je lepší než nepovlakovaný. Vývoj povlaků si prošel několika tzv. generačními fázemi. Na trhu jsou v současné době k dostání kvalitní povlaky jako např. TiN, TiCN, TiAlCrN a TiAlN určené pro řezné nástroje. Jedná se o ukázkou některých z mnoha dalších povlaků a jejich modifikací. Metody, kterými dochází k vytváření povlaků, se nazývají PVD (fyzikální napařování) a CVD (chemické napařování z plynné fáze). Dále existují ještě i mnohé jiné metody nanášení povlaků, které více či méně vycházejí z principu dvou předešlých metod.

Samotným povlakováním se zvyšuje trvanlivost nástroje, dochází ke snížení sil a řezných výkonů, což umožňuje zvýšit produktivitu a snížit časové prostoje [11].

2.9.2 Klasifikace slinutých karbidů

Výzkumná činnost v oblasti slinutých karbidů způsobila, že se vyskytlo a vyskytuje v dnešní době na trhu rozsáhlý sortiment SK. V roce 1964 ISO zavedla normu ISO R513 dle ní jsou karbidy rozděleny do třech skupin (označené barvou a písmenem).

Skupina P – je značena modrou barvou. Jedná se o dvousložkový karbid typu WC + TiC (TaC) + Co. S vysokým obsahem karbidů Ti a Ta. Vhodné pro obrábění materiálů, které dávají dlouhou plastickou třísku (nelegované a legované konstrukční oceli, ocelolitina). TiC zvyšuje tvrdost za tepla, ovšem jeho nevýhodou je vyšší křehkost a nižší odolnost proti abrazivnímu opotřebení.

Skupina M – je značena žlutou barvou. Karbidy vícesložkové typu WC + TiC + (TaC, NbC) + Co. S nižším obsahem TiC a vhodné pro obrábění materiálů, které dávají dlouhou i krátkou třísku (lité oceli, austenitické oceli, tvárná litina). Nepatří mezi univerzální SK, a proto jim přísluší speciální použití.

Skupina K – značena barvou červenou. Složena z čistého a jednosložkového karbidu WC + Co. Vhodné na obrábění materiálů s krátkou a křehkou třískou (litiny, neželezné slitiny, nekovové materiály). Řezné síly jsou při obrábění uvedených materiálů relativně nízké, přičemž převládá abrazivní a adhezní opotřebení.

Dělení do 3 skupin vychází ze starší ISO normy, a proto se lze dnes i setkat s rozdělením SK do 6 skupin, kdy ke skupinám P, M, K dále patří skupiny N (zelená), S (hnědá) a H (šedá).

Každá ze skupin se rozlišuje číslem za písmenem, které určuje jeho pozici ve stupnici od nejvyšší tvrdosti po nejvyšší houževnatost. Houževnatost se zvětšuje se zvyšující se hodnotou čísla. Co se týče klasifikace ISO, ta rozděluje karbidy dle vhodnosti pro obrábění konstrukčních materiálů v závislosti na namáhání řezného klínu při řezání, ale neuvádí žádné informace o druhu a vlastnostech karbidů (nepovlakovaný, povlakovaný, jemnozrný...atd.). Nepopisuje tak výkonnost a kvalitu materiálu řezné části nástroje, ale oblast použití. Dále ještě tato klasifikace rozlišuje způsob obrábění.

Jednotlivé vyráběné druhy karbidů a jejich následné zařazení do systému označování si každý z výrobců určuje sám, přičemž si ponechává svoje obchodní značení. Výrobce může například přidat dva a více druhů do jedné skupiny. Ovšem pouze v případě, že odpovídají svými vlastnostmi charakteristice dané skupiny. Může dojít i k situaci, kdy některý druh karbidu od jednoho výrobce je zařazen zároveň ve dvou skupinách. Výrobci rozdělují základní skupiny P, M, K dále i do dalších skupin, dle kterých třídí konstrukční materiály a přiřazují jim druhy slinutých karbidů s doporučením na způsob obrábění a volbu řezných podmínek [10].

3 PARAMETRY BROUSICÍCH KOTOUČŮ A BROUŠENÍ

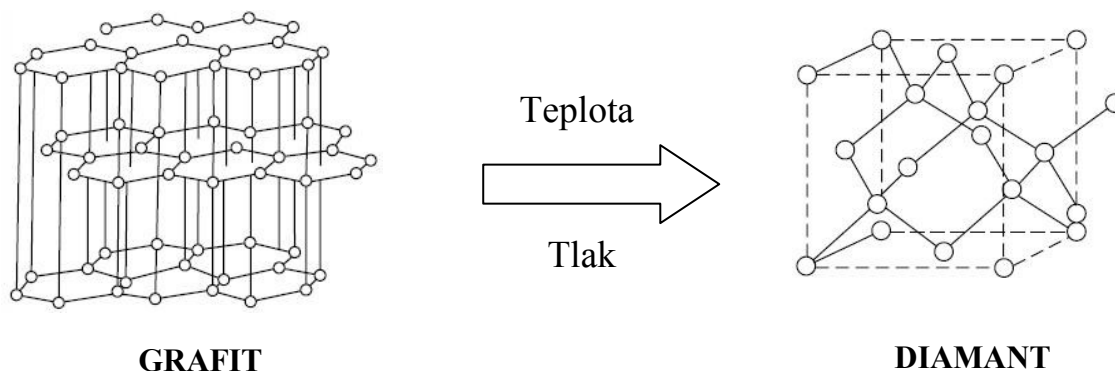
Brousicí kotouč s brusivem z diamantu je charakterizován těmito základními znaky:

- druh brusiva
- tvar kotouče
- rozměr kotouče
- druh pojiva
- zrnitost brusiva
- koncentrace brusiva

3.1 Druh brusiva

Diamant je forma uhlíku krystalizující v kubické modifikaci, která obsahuje jen velmi malé množství příměsí jiných chemických prvků. Má specifickou hmotnost $3,52 \text{ g.cm}^{-3}$. Vyskytuje se v přírodní formě a též se i připravuje syntézou za vysokých tlaků a teplot. Jedná se o nejtvrďší známý materiál, jehož tvrdosti se mu přibližují jen materiály na bázi sloučenin boru. V Mohsově stupnici tvrdosti zaujímá 10 místo. Další jeho vynikající vlastností je jeho dobrá tepelná vodivost a tepelná odolnost do 860°C . Za normální teploty je odolný vůči všem chemickým vlivům. Z důvodu své afinity k železu za vysokých teplot není vhodný pro zpracování oceli, což vede k vývinu tepla mezi diamantovými zrny a ocelí a k následné chemické reakci. Všechno tyto aspekty vedou ke změně struktury nejen diamantu, ale i povrchu obrobku. Diamant se proto využívá na broušení tvrdých a křehkých materiálů jako právě slinutý karbid, keramika, sklo, kámen apod [7].

Syntetický diamant je vyráběn syntézou za vysokých tlaků a teplot, kdy během celého procesu dochází k tavení katalyzátoru a materiálu bohatý na uhlík. Právě atomy uhlíku mění svoji hexagonální mřížku na kubickou, která je typická pro diamant (obr. 8). Zdrojem uhlíku bývá nejčastěji použit grafit a katalyzátorem může být použit široký rozsah materiálů (nikl, kobalt, železo...atd.), které se dále dělí do dvou skupin na karbidotvorné a nekarbidotvorné. Pevnost a vlastnosti krystalů syntetických diamantů jsou dány složením základního materiálu a podmínkami syntézy.



Obr. 8 Změna hexagonální mřížky grafitu na kubickou (diamant) [3]

Syntetické diamanty mají různé základní tvary svých krystalů. Při jejich výrobě můžeme změnou teploty v procesu výroby měnit jejich tvar (obr. 9). Za nižších teplot dostáváme krychlový tvar, při středních teplotách dostaneme kubooktaedrický tvar a při vyšších teplotách oktaedrický [3].



Obr. 9 Tvary krystalů syntetického diamantu [3]

3.2 Tvar kotouče

Tvary jsou normalizovány a mezi nejznámější tvary kotoučů se řadí obvodové, hrncovité, ploché, miskovité, kuželové, čelní úhlové, prstencové.

V praxi jsou tvary kotoučů v katalozích označovány typovým číslem, které určuje základní tvar a je přizpůsobeno ve většině případů standardu ISO 6104 a 6168 [7].

3.3 Rozměr kotouče

Mezi základní rozměry kotouče patří průměr kotouče, šířka a tloušťka brousicí vrstvy, celková výška kotouče, rozměr upínacího otvoru, případně úhel zkosení, rádius apod.

Průměr brousicího kotouče: čím větší je průměr kotouče, tím příznivější jsou kinematické a termické podmínky broušení. Je to způsobeno tím, že brusné zrno je následkem delší ochlazovací dráhy méně namáhané, což příznivě působí na životnost kotouče. Volba průměru závisí také na typu brusky, jejíž konstrukce by měla zaručit dosažení doporučených pracovních rychlostí.

Šířka brousicí vrstvy: zásadně musí být využívána celá šířka brousicí vrstvy, což ale ovšem neplatí u tvarových kotoučů. Toho je možno dosáhnout posuvem obrobku nebo brousicího kotouče přes celou broušenou plochu, popřípadě použitím užší brousicí vrstvy než je šířka broušené plochy (platí u čelních kotoučů). Úzká brousicí vrstva umožňuje vyšší výkon broušení s malým vývinem tepla. Naopak příliš široká brousicí vrstva způsobuje vysokou teplotu v místě řezu, což může mít vliv na snížení výkonu.

Tloušťka brousicí vrstvy: mohou být různé. Silnější brousicí vrstva zvýší prodejní cenu nástroje o vyšší obsah brusiva, ale náklady na broušení se sníží.

Jako základní tloušťka brousicí vrstvy čelních kotoučů je doporučována tloušťka 2 mm u pryskyřičných pojiv a 1,5 mm u kovových pojiv [7].

3.4 Druh pojiva

Pojivo slouží jako vazba mezi brusivem a polotovarem. Určuje například, jak pevně budou krystaly brusiva v nástroji držet, a jak velkou částí budou vystupovat nad jeho povrch.

Pojiva brousících kotoučů ovlivňují rozhodujícím způsobem výkon broušení, životnost kotoučů, tvarovou stálost, samoostřicí vlastnosti a mnohé další atributy. Výběrem pojiva ovlivníme, zda diamantový kotouč brousí s velkým výkonem broušení při malém přitlaku, ovšem s kratší životností (měkké pojivo) nebo s velkou životností při nižším

výkonu a větším přitlaku (tvrdé pojivo). Na vhodnou volbu pojiva má vliv kromě broušeného materiálu a druhu brusiva dále ještě i druh operace a způsob broušení.

Používají se 3 druhy pojiv:

- a) organické
- b) kovové
- c) keramické

Organická pojiva jsou odvozena od fenolformaldehydových pryskyřic. Jedná se o nejpoužívanější pojivo (pryskyřičné), jelikož se vyznačuje vysokou produktivitou broušení, nízkým vývinem tepla či dobrými samoostřicími vlastnostmi. Je vhodné hlavně při broušení slinutých karbidů. Jsou značena B-I až B-XVII a je potřeba při jejich použití chlazení. Za určitých podmínek je možno i použití bez chlazení (úzká brousící vrstva, nižší obvodová rychlost, přitlak, posuv, nižší koncentrace apod.).

Kovová pojiva jsou tvrdší než organická (pryskyřičná). Používají se převážně pro broušení s diamantem a výhradně s chlazením. Firma Urdiamant, s.r.o. ve svém nabídkovém katalogu nabízí kovové pojivo SKM, bronzové a galvanické.

Pojivo SKM se vyznačuje vysokou tvrdostí a její využití je pro broušení otvorů, kde nedostatečná brousící rychlost je eliminována vysokou tvrdostí pojiva a koncentrací brusiva. Bronzová pojiva s označením BZ-1 až BZ-8 se v převážné většině používají pro broušení slinutých karbidů. Speciální pojivo BZ-9 lze také použít na slinutý karbid při broušení čelními kotouči. U označení bronzových pojiv platí čím vyšší číslo, tím vyšší tvrdost pojiva. Galvanické pojivo je využíváno k výrobě tvarově složitějších nástrojů. K výhodám kotoučů s tímto pojivem patří vysoký brousící výkon, nízké pořizovací náklady, vysoká stálost tvaru a nízký vývin tepla. Nevýhodou je malá životnost, která je dána pouze jednou vrstvou diamantu.

Keramické pojivo má pozitivní vliv na vlastnosti brousícího kotouče. Kotouč s tímto pojivem vykazuje velmi dobré řezné vlastnosti, nezanášejí se a zajišťují vysokou kvalitu povrchu obrobené ploch. Za předpokladu, že je dodrženo dostatečné chlazení [7].

3.5 Zrnitost brusiva

Zrnitost brusiva se udává zlomkem. K zjišťování zrnitosti dochází přesíváním zrn přes dvě síta. V čitateli je udávána jmenovitá délka strany oka vrchního kontrolního síta, přes které musí zrno propadnout. Ve jmenovateli je uvedena jmenovitá délka strany oka spodního síta, na kterém se musí zrna zadržet.

Zrnitost brusiva má vliv na drsnost povrchu. Se zvětšující se zrnitostí se drsnost obrobeného povrchu zhoršuje. U diamantových kotoučů je zrnitost značena dle ISO 6106 (FEPA).

3.6 Koncentrace brusiva

Vyjadřuje hmotnostní obsah brusiva (diamantu) v 1 cm^3 brousící vrstvy, vyjádřené vzorcem $K=\text{g}.\text{cm}^{-3}$ ($\text{crt}.\text{cm}^{-3}$). Jako základ byla stanovena koncentrace K100, kde 1 cm^{-3} brousící vrstvy obsahuje 0,88 g (4,4 crt.) brusiva a zaujímá 25% objemu brousící vrstvy. Koncentrace brusiva má vliv na broušení.

Nízká koncentrace (K25, K50) zaručuje dobré samoostřicí vlastnosti kotouče, zvyšuje výkon broušení, snižuje vývin tepla a životnost kotouče, zhoršuje stálost tvaru, zvyšuje drsnost povrchu.

Střední koncentrace (K75, K100) se používá ve většině brousících operací.

Vysoká koncentrace (K125, K150) zvyšuje životnost kotouče, zlepšuje stálost tvaru, snižuje drsnost povrchu a výkon broušení, zhoršuje samoostřicí vlastnosti kotouče, zvyšuje vývin tepla [7].

3.7 Podmínky použití brousících kotoučů

Jedná se o podmínky, které mají vliv, na konečný efekt broušení:

- stav stroje
- upínání kotouče
- řezné podmínky
- chlazení
- čištění, ožiování a orovnávání kotoučů

Stav stroje: používání diamantového kotouče si vyžaduje po technické stránce podstatně vyšší nároky na stav stroje, než při použití kotoučů s klasickými brusivy. Stroj musí mít zajištěnou dokonalou tuhost a být zbaven vibrací. Vřeteno musí být uloženo s maximální radiální a axiální házivostí 0,005 mm a zaručující minimální chvění při broušení.

Důležitou z podmínek je tuhé uchycení či upnutí obrobku. Jakékoliv chvění stroje nebo obrobku nepříznivě ovlivňuje životnost kotouče, drsnost povrchu, ale i výkon broušení a stálost tvaru kotouče.

Upínání broušícího kotouče: radiální a axiální házivost kotoučů by neměla přesáhnout hodnotu 0,03 mm. Z tohoto důvodu se doporučuje, aby každý kotouč měl vlastní upínací trn nebo přírubu a nebyl po celou dobu životnosti z těchto upínacích přípravků snímán. Kotouče větších rozměrů a hmotností jsou dynamicky vyvažovány. Tímto vyvážením podstatně snížíme chvění a vibrace při broušení, čímž se zvyšuje výkon, životnost kotouče, kvalita výbrusu apod.

Řezné podmínky: základem pro ekonomické využití diamantového kotouče je správný výběr jeho charakteristik, které výrobci nabízejí. Tj. typ, rozměr, pojivo, zrnitost brusiva, koncentrace brusiva, ale i jeho použití za vhodných řezných podmínek, na vhodném typu broušícího stroje. Stejně důležité je chlazení, tuhé upnutí nástroje i obrobku, obráběný materiál, přídavky na broušení, požadovaná drsnost povrchu, možnost orovnávání, případně čištění kotouče atd.

K výběru vhodných řezných podmínek slouží údaje v katalogu brusných kotoučů dodávané výrobcem.

Charakteristické parametry řezných podmínek:

v_k – obvodová rychlost kotouče [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

v_o – obvodová rychlost obrobku [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]

v_p – podélná rychlost obrobku (posuv) [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]

v_z – rychlost přísluvu (zápichové broušení) [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]

s_p – příčný posuv [mm]

t – přísluv (hloubka třísky) [mm]

v_b – obvodová rychlost podávajícího kotouče (pro bezhroté broušení) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

α° – úhel nastavení podávajícího kotouče (pro bezhroté broušení)

Efektivnost broušení ovlivňuje kromě výše uvedených parametrů celá řada dalších podmínek jako je např. chlazení, velikost styčné plochy kotouče s obrobkem, způsob podávání (ruční, poloautomat, automat), kvalifikace obsluhy apod.

Chlazení brousících kotoučů: již zmíněno v podkapitole 2.8 Procesní média.

Čištění, oživování a orovnávaní: čištění kotouče se provádí v pracovní poloze pemzou, úlomkem SiC kotouče, popřípadě oživovacími kameny. Je prováděno pouze tehdy, jestliže dojde k zalepení brousících zrn odbroušeným materiálem, zvláště při broušení nevhodných kombinací materiálů jako je například SK v kombinaci s měkkou ocelí.

Oživování kotoučů se provádí při ztrátě brousící schopnosti kotouče v důsledku snížení samoostřících vlastností. Provádí se buď mimo stroj (SiC brusivem na skleněné podložce) nebo v pracovní poloze přímo na stroji (přisypáváním SiC mezi brousící vrstvu a kostku z měkké oceli či litiny). Osvědčené jsou i oživovací kameny s keramickým nebo pryžovým pojivem

Orovnávání kotoučů se provádí v případě ztráty tvaru brousící vrstvy a velkém poklesu brousících schopností. Speciální brusky, které jsou určený pro broušení diamantovými kotouči, mají již nainstalováno orovnávací zařízení, kde výrobce doporučuje vhodný typ orovnávacího kotouče se SiC brusivem. Je nepřijatelné orovnávaní diamantového kotouče diamantovým orovnávačem jakéhokoliv provedení [7].

3.8 Hodnocení řezivosti brousících kotoučů

Pro účely výroby fréz broušením je zapotřebí zvolit vhodné brousící kotouče a posoudit jejich řezné vlastnosti. Při hodnocení kvality brousícího kotouče a účinnosti broušení je potřeba určit základní, silové, energetické a doplňkové ukazatele. Ve většině případů stačí určit pouze základní ukazatele [4].

Základní ukazatele:

- a) produktivita broušení, která je dána úběrem kovu Q_m [$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]
- b) opotřebení brousícího kotouče Q_a [$\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]
- c) brusný poměr

$$G = \frac{Q_m}{Q_a} \quad (7)$$

- d) trvanlivost kotouče T_k [min]
- e) drsnost obrobené plochy R_a [μm]

Silové ukazatel:

- a) tangenciální složka síly F_c [N]
- b) radiální složka síly F_p [N]
- c) měrná tangenciální síla (vztažená k jednotkové šířce kotouče)

$$F'_c = \frac{F_c}{H} [\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (8)$$

- d) měrná radiální síla (vztažená k jednotkové šířce kotouče)

$$F'_p = \frac{F_p}{H} [\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (9)$$

- e) měrný řezný odpor

$$p = \frac{F_c}{f} [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (10)$$

kde f je jmenovitý průřez odebírané vrstvy

Energetické ukazatele

- a) skutečný měrný příkon broušení (vztažený na jednotku šířky kotouče)

$$N_e = \frac{F_c \cdot v_k}{H} [\text{kW} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (11)$$

- b) měrná práce broušení

$$E_m = \frac{60 \cdot N_e}{Q_m} [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-3}] \quad (12)$$

- c) měrná práce broušení vzhledem k opotřebení kotouče

$$E_a = \frac{60 \cdot N_e}{Q_a} [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-3}] \quad (13)$$

Doplňkové ukazatele

- a) součinitel řezivosti kotouče

$$k_r = \frac{Q_m}{F_p} [\text{mm}^3 \cdot \text{N} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (14)$$

- b) součinitel samoostření

$$k_s = \frac{Q_a}{F_p} [\text{mm}^3 \cdot \text{N} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (15)$$

- c) součinitel broušení

$$\mu = \frac{F_c}{F_p} \quad (16)$$

- d) součinitel úběru

$$k = \frac{Q_m}{Q_{m\text{vypoč}}} \quad (17)$$

4 DISKUZE EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

Dle zadání diplomové práce jsem se po dobu testovací výroby soustředil na proměření faktorů a vlivů působících na výrobu monolitních fréz ze slinutého karbidu broušením. Stěžejním bodem experimentální části bylo zkoumání vlivu vstupních parametrů kotoučů na výrobu nejnáročnější části fréz, kterými jsou drážky pro odvod třísek, jak jsem již z části zmínil v kapitole 1.2 Řešená problematika. Více popíši a rozvinu dané téma v právě v této části diplomové práce týkající se testovací výroby a experimentálních měření.

4.1 Návrh testovací výroby

Výroba určená pro testování probíhala způsobem, že byly vybrány tři kotouče typu 1A1 (značeno dle standardu FEPA) u kterých byly různé charakteristické rysy měněny – typ diamantu, zrnitost a pojivo. Pro konečné zhotovení kompletního výrobku resp. frézy bylo zapotřebí použití i kotoučů typu 11V9 a 12V9 u nichž ovšem tyto parametry byly ponechány stále stejné a nedocházelo dále k jejich změně. O bližší specifikaci jednotlivých brousicích kotoučů se ještě zmíním v kapitole 4.2 Testovací podmínky. Vyráběným nástrojem byla válcová čelní stopková fréza s počtem čtyř zubů. Fréza bude použita dále v praxi na obrábění materiálů 11 600, 12 050 a dural.

4.2 Testovací podmínky

4.2.1 Testovací zařízení

Testovací výroba byla provedena na univerzální CNC brusce nástrojů Walter Helitronic Mini Power (obr. 10) od německé společnosti WALTER Maschinenbau GmbH se sídlem v Tübingenu. Bruska má 5 CNC řízených os a je určena speciálně pro výrobu fréz, vrtáků, stupňovitých vrtáků a nástrojů popř. pro nástroje na opracování dřeva, profilových nožů či nástrojů.

Parametry brusky:

- | | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| - příkon stroje | 25 [kVA] |
| - otáčky brousícího vřetena | 0 – 9500 [min ⁻¹] |
| - pohyb v ose X | 350 [mm] |
| - pohyb v ose Y | 200 [mm] |
| - pohyb v ose Z | 470 [mm] |
| - rychloposuv X/Y/Z | 15 [m·min ⁻¹] |



Obr. 10 Walter Helitronic Mini Power [16]

4.2.2 Testovací materiál

Tyčový polotovar v toleranci h5 o \varnothing 10, 14, 20 mm ze slinutého karbidu byl dodán německou firmou Gerhard Ihle Hartmetalle. Jeho obchodní označení je CKi[®]10 (K 40 UF) a dle normy ISO patří do skupiny K30-K40. Vyznačuje se vysokou houževnatostí, tvrdostí a je proto doporučován na rotační nástroje určené k obrábění titanových slitin, tepelně odolných slitin, austenitických korozivzdorných slitin a šedé litiny.

Na základě objednávky dodala německá společnost Gerhard Ihle Hartmetalle polotovary i v požadované délce a to následovně: \varnothing 10 x 93 mm

\varnothing 14 x 75 mm

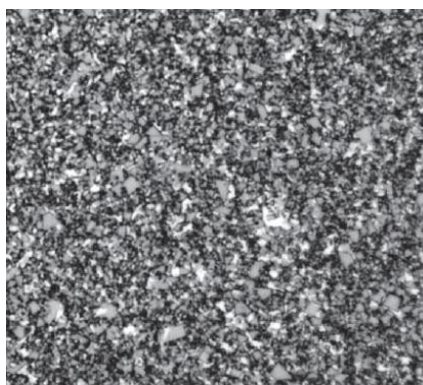
\varnothing 20 x 79 mm

Chemické složení: 90 % WC
10% Co

Fyzikální vlastnosti:

- hustota 14,5 g/cm³
- tvrdost HRA 90,5
- tvrdost HV 30 1610
- pevnost v ohybu 3600 N/mm²
- velikost zrna 0,6 μ

Pohled na strukturu CKi[®]10 při zvětšení 1:1500:



Obr. 11 Struktura CKi[®]10 [12]

4.2.3 Brousicí kotouče

K provedení testovací výroby dodala firma Urdiamant, s.r.o. potřebné diamantové kotouče. Jednalo se o obvodové kotouče A1A použité na výrobu šroubovice nástroje. Tyto kotouče měly stálou koncentraci s tím, že měněna u nich byla jejich zrnitost, pojivo a druh použitého brusiva resp. typ diamantu. Jejich rozměry jako průměr kotouče, šířka a výška brusné vrstvy byly po dobu testování stejné.

Mezi další použité kotouče potřebné k výrobě ostatních částí frézy patří typy 11V9 (břit, čelo, 1. a 2. fazetka na čele, 1. a 2. fazetka na válci) a 12V9 (zubové mezery). U těchto miskových kotoučů nedocházelo k jejich změně v parametrech, jak tomu bylo u 1A1 kotouče.

Všechny potřebné informace k použitým kotoučům jsem přehledně zanesl do tabulky 1, z níž jsou jasné patrné jednotlivé použité charakteristické parametry, a každému kotouči je přiřazeno číslo. Z důvodu ochrany interních údajů firmy Urdiamant, s.r.o. jsem nemohl uvést přesné označení typu diamantu a pojiva resp. jejich přesné složení a značení. Pro účely diplomové práce bylo tedy zapotřebí použít vlastní pracovní označení.

U pojiva tomu bylo takto:

HP – hybridní pojivo

PP – pryskyřičné pojivo

BP – bronzové pojivo

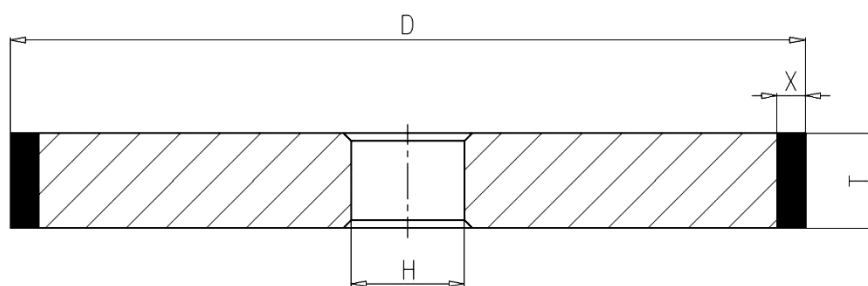
Typ diamantu byl označen následovně: D1, D2, D3. Jejich dodavatelem byly společnosti De Beers (Jihoafrická republika) a LANDS Superabrasives (Spojené státy americké) zabývající se produkcí a distribucí diamantů.

Označení ostatních údajů bylo již plně ponecháno, jak je standardně zvykem.

Tab. 1 Značení a parametry použitých brousicích kotoučů

Číslo kotouče	Typ kotouče	Druh brusiva	Typ diamantu	Pojivo	Zrnitost	Koncentrace
1	1A1	DIA	D1	HP	64	K100
2	1A1	DIA	D2	PP	64	K100
3	1A1	DIA	D3	BP	64	K100
4	1A1	DIA	D1	HP	126	K100
5	1A1	DIA	D2	PP	126	K100
6	1A1	DIA	D3	BP	126	K100
7	11V9	DIA	D1	HP	64	K100
8	12V9	DIA	D1	HP	64	K100

Tvary jednotlivých typů brousicích kotoučů odpovídaly standardu dle FEPA. Na grafickém znázornění lze vidět tvar každého kotouče společně s umístěním brusné vrstvy a uvedením všech jeho rozměrů. Kotouč 1A1 (obr. 12), 11V9 (obr. 13), 12V9 (obr. 14).



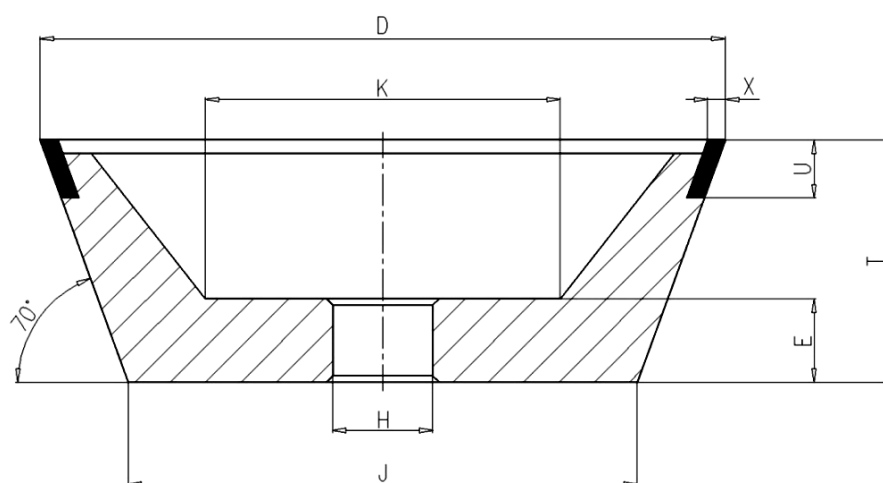
Obr. 12 Tvar brousícího kotouče typu 1A1 (označení 2-100-10/6)

Rozměry kotouče: $D = 100 \text{ mm}$

$T = 10 \text{ mm}$

$X = 6 \text{ mm}$

$H = 20 \text{ mm}$



Obr. 13 Tvar brousícího kotouče typu 11V9 (označení 11-100-3/10-70°)

Rozměry kotouče: $D = 100 \text{ mm}$

$X = 3 \text{ mm}$

$U = 10 \text{ mm}$

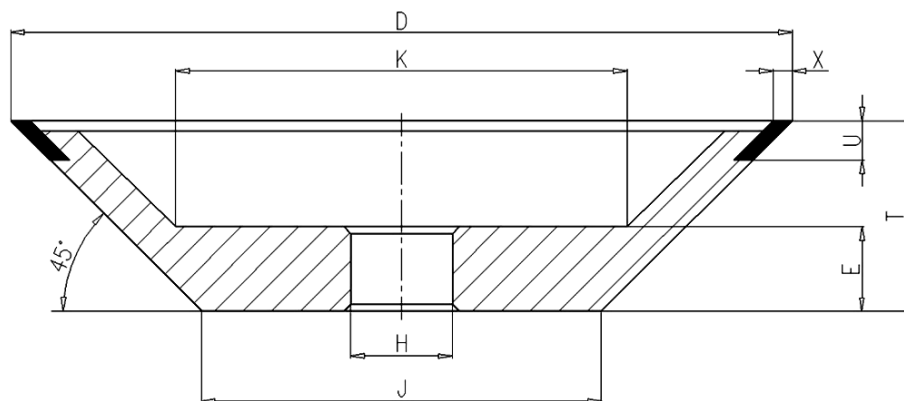
$T = 35 \text{ mm}$

$E = 10 \text{ mm}$

$J = 75 \text{ mm}$

$$K = 55 \text{ mm}$$

$$H = 20 \text{ mm}$$



Obr. 14 Tvar brousícího kotouče typu 12V9 (označení 11-100-3/10-45°)

Rozměry kotouče: $D = 100 \text{ mm}$

$$X = 3 \text{ mm}$$

$$U = 10 \text{ mm}$$

$$T = 20 \text{ mm}$$

$$E = 10 \text{ mm}$$

$$J = 60 \text{ mm}$$

$$K = 65 \text{ mm}$$

$$H = 20 \text{ mm}$$

4.2.4 Řezné podmínky

Vstupní parametry resp. podmínky byly nastaveny jako maximálně možné, které jsou používány v praxi při výrobě, čemuž se děje i z hlediska bezpečnosti a obsluhy CNC brusky. Hodnoty obvodové rychlosti a posuvu byly voleny na základě doporučení a již dřívějších zkušeností z interních měření firmy Urdiamant, s.r.o. spojených s výrobou frézovacích nástrojů broušením. Vycházel jsem taktéž z parametrů testovacího zařízení a parametrů doporučených výrobcem.

4.3 Postup testovací výroby

Před začátkem brouscího procesu byl na CNC brusce nastaven režim obrábění se zvolenou vhodnou geometrií a parametrech broušení jako je posuv a obvodová rychlost. Došlo k upnutí obrobku do kleštiny CNC brusky Walter Helitronic Mini Power a v ní mechanická dotyková sonda zaměřila ustavení nástroje, výchozí polohu obrobku a později korekce nástrojů, přičemž celý tento úkon trvá 8 sekund, které jsou započteny do výsledného času celkového výrobního procesu frézy.

V první testovací výrobě bylo vyrobeno po pěti frézách od každého průměru (10, 14, 20 mm). Během průběhu brouscího procesu byl sledován z obrazovky na brusce výrobní čas šroubovice nástroje, byl zapsán celkový čas výroby 1ks frézy a následně drsnoměrem naměřena drsnost povrchu vyrobeného kusu. Měření drsnosti bylo prováděno na výběhu z drážky či popřípadě na zkušební ploše (10 mm široká a do hloubky 3 mm) drsnoměrem Surftest SJ-301 od firmy Mitutoyo. Je též sledováno, jestli se kotouč nepálí, píská či nevydává nestandardní zvuky. Na samotném konci výroby došlo k vyfocení jednotlivých vzorků, jejich porovnání a optické kontrole. Celkově došlo v první testovací výrobě ke zhotovení celkově 45 ks monolitních fréz o výše zmíněných průměrech.

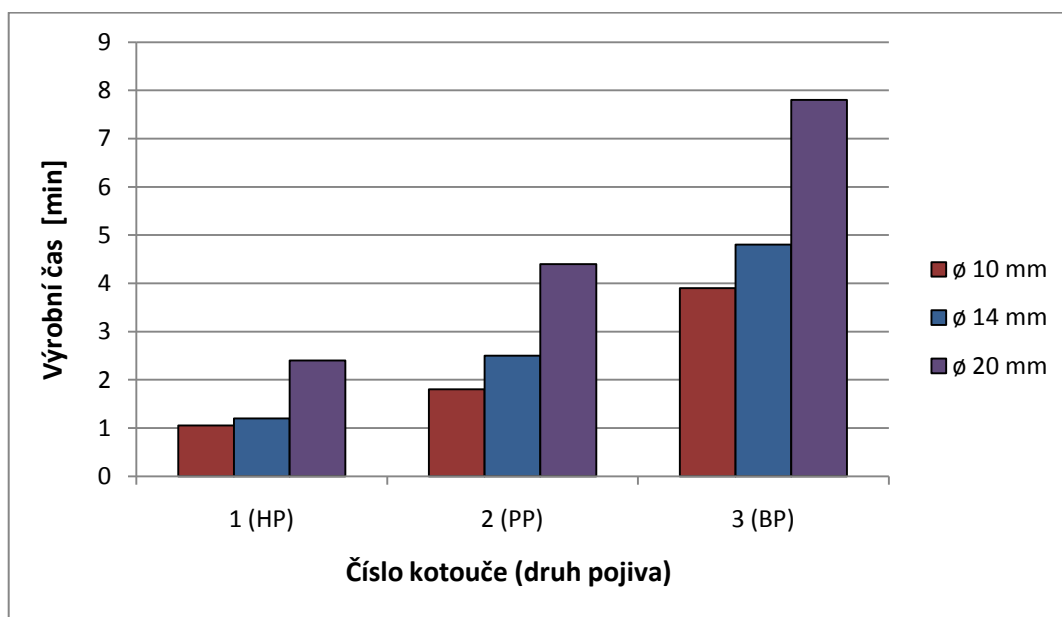
V druhé testovací výrobě došlo u kotoučů typu A1A ke změně zrnitosti při zachování původní koncentrace a použitého typu diamantu. Celý postup testovací výroby byl stejný jako v první fázi. Tentokrát ovšem byly porovnány i změny hodnot posuvu oproti první testovací výrobě. Stejně jako v první i v druhé testovací výrobě došlo ke zhotovení celkově 45 ks monolitních fréz.

Během celého výrobního procesu fréz byly z monitoru CNC brusky sledovány točivé momenty (odpory broušení) v závislosti na posuvu, které se později vyhodnotily. Po dobu provádění testovací výroby monolitních fréz byl hubicí do styku kotouče s obrobkem jako procesní médium přiváděn minerální olej.

4.4 Výsledky a vyhodnocení testovací výroby

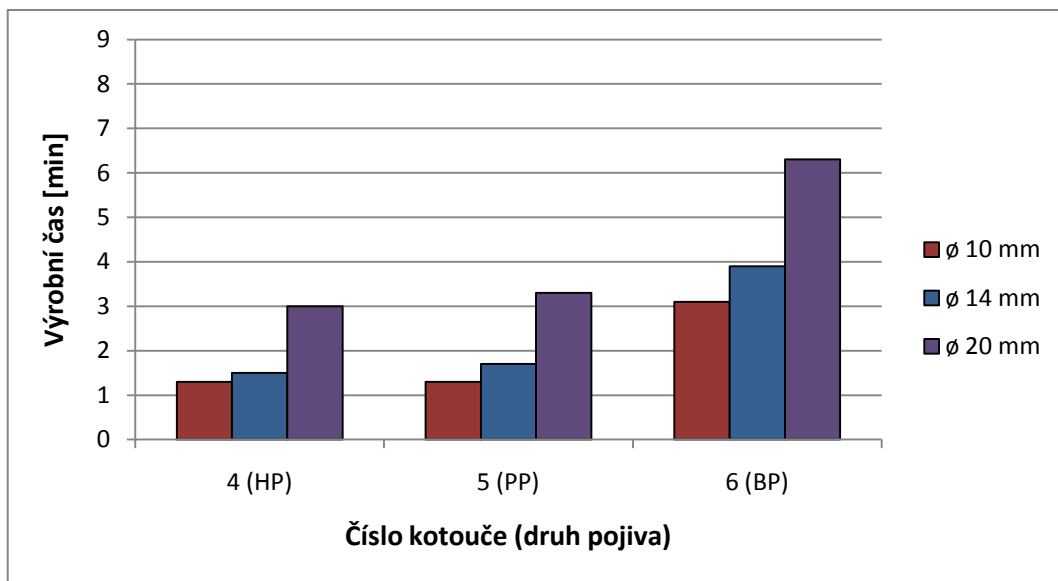
4.4.1 Výrobní časy drážek pro odvod třísek

Uvedené výrobní časy do grafů jsou vyhodnoceny z tabulek 5 a 6, které jsou součástí příloh. Časy výroby se týkají kotoučů při použití zrnitosti D64, D126 a druhu pojiva. Hodnoty časů jsou převedeny na celá čísla i s desetinnými pro snadnější zanesení a čtení z grafu.



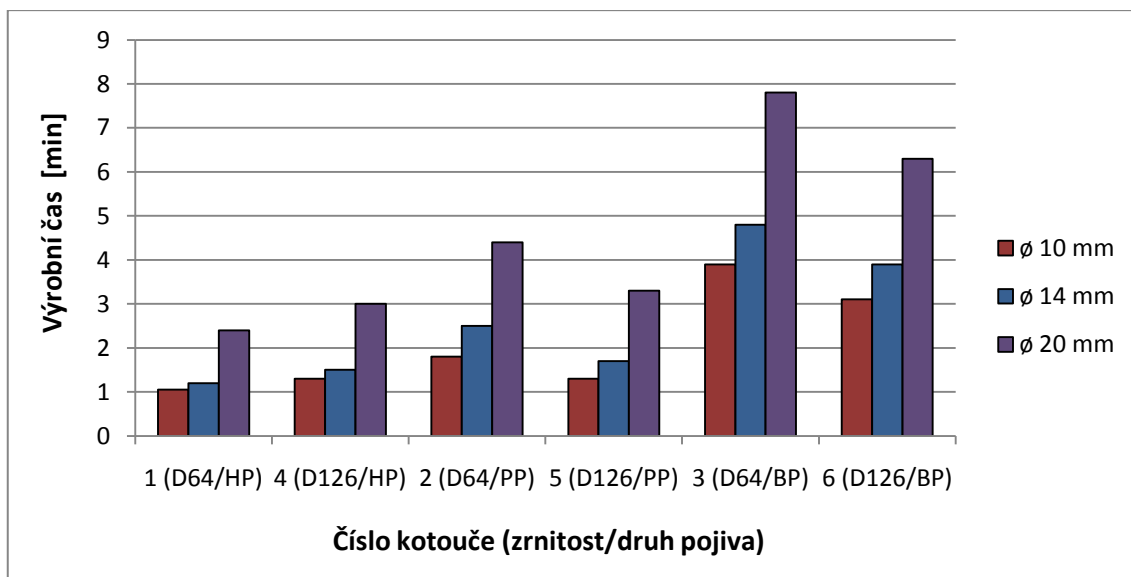
Graf č. 1 Výrobní časy drážek při použití zrnitosti D64 a různých druhů pojiv

V grafu je možno vidět, že použitím hybridního pojiva a zrnitosti D64 dojde ke zkrácení výrobních časů u všech průměrů vyráběných fréz než je tomu například v případě bronzového pojiva. Z jejich porovnání vyplývá závěr, že použití hybridního pojiva při zrnitosti D64 vede k rychlejší výrobě drážky pro odvod třísek až 3x oproti bronzovému pojivu. V případě průměru 14 mm dokonce 4x rychleji.



Graf č. 2 Výrobní časy drážek při použití zrnitosti D126 a různých druhů pojiv

Graf č. 2 znázorňuje časy výroby šroubovice frézy při použití tentokrát vyšší zrnitosti D126. Výsledky jsou podobné jako v případě předchozí zrnitosti, ovšem již zde není tak výrazná dominance hybridního pojiva oproti dvěma ostatním druhům, jelikož kotouč s pryskyřičným pojivem dosahuje téměř stejných časů.



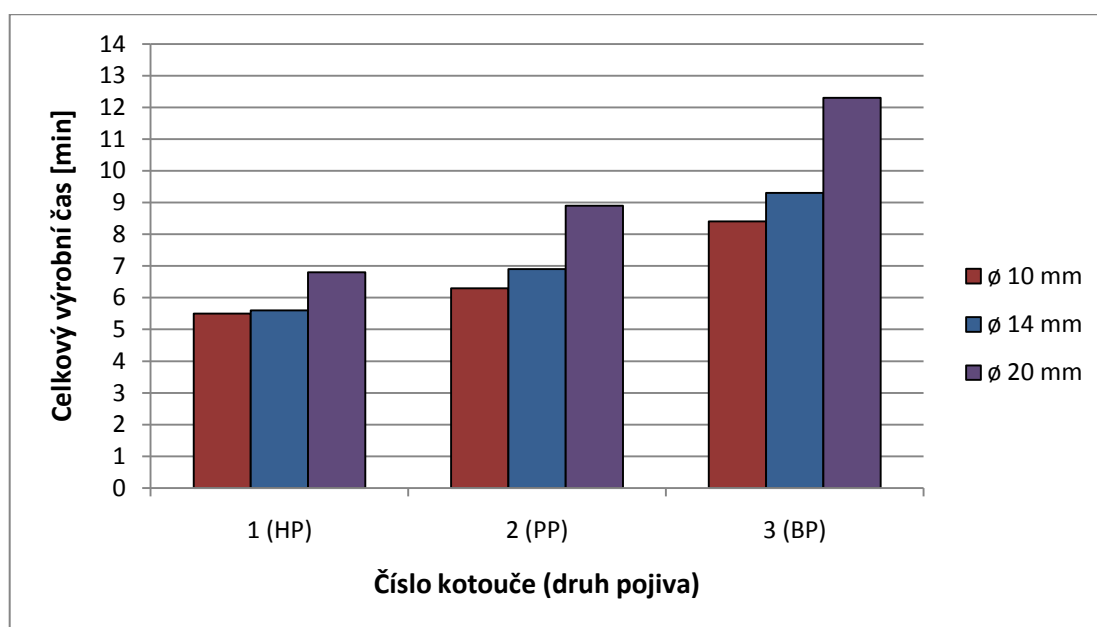
Graf č. 3 Porovnání výrobních časů drážek na odvod třísek

Tento graf slouží ke srozumitelnějšímu znázornění dosažených výrobních časů všemi šesti brousícími kotouči při změně zrnitosti a druhu pojiva. Při použití zrnitosti D126 došlo u kotouče č. 4 s hybridním pojivem ke zvýšení času výroby. U pryskyřičného a

bronzového pojiva došlo k jejich snížení oproti drsnosti D64. Podíl na tom má i změna posuvu, kdy muselo dojít u hybridního pojiva ke snížení a u ostatních dvou pojiv k jeho zvýšení. Tato problematika ohledně důvodů změny v závislosti na zrnitosti a druhu pojiva bude ještě zmíněna i v dalším průběhu experimentální části.

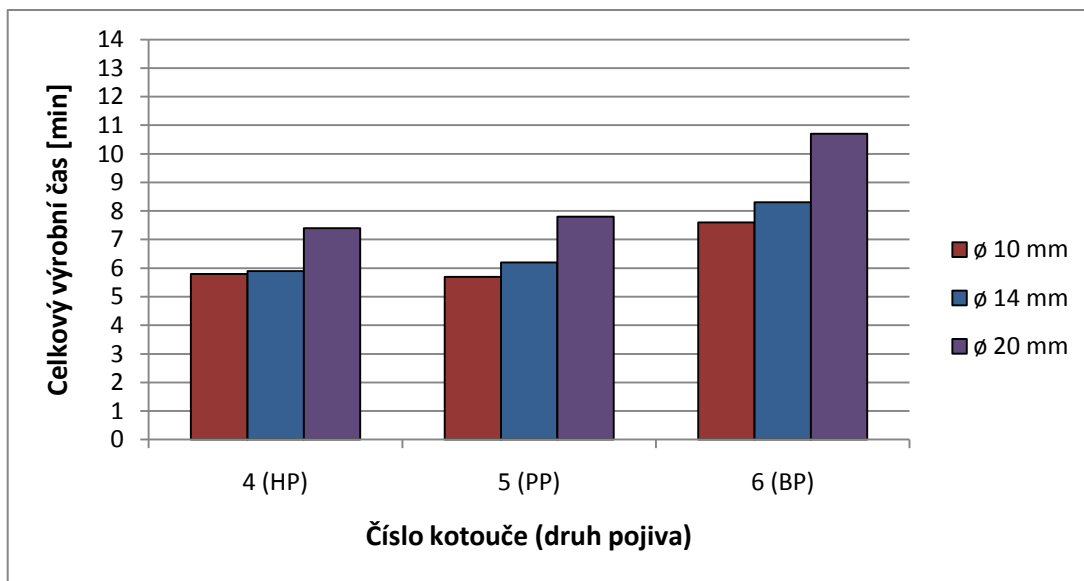
4.4.2 Celkové výrobní časy fréz

Celkové časy jsou do grafů zaneseny z tabulek 5 a 6, které nalezneme v přílohách. Opět se jedná o dosažené časy při použití zrnitosti D64, D126 a druhu pojiva. Hodnoty časů jsou převedeny na celá čísla i s desetinnými pro snadnější zanesení a čtení z grafu.



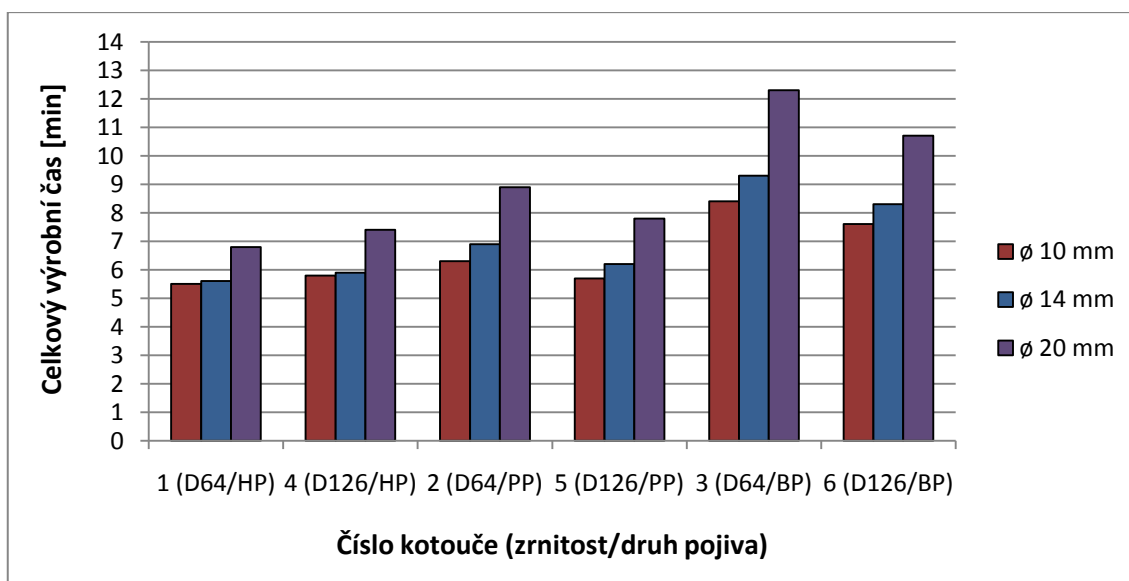
Graf č. 4 Celkové výrobní časy fréz při použití zrnitosti D64 a různých druhů pojiv

Stejně jako v časech týkající se výroby šroubovice nástroje resp. drážek na odvod třísek dosáhlo nejnižších hodnot časů hybridní pojivo oproti bronzovému, promítá se tento fakt logicky i do celkových časů potřebných pro výrobu 1ks frézy. Lze si ovšem například všimnout výrazného rozdílu bronzového pojiva oproti hybridnímu na celkový výrobní čas frézy o průměru 20 mm, kde je více než 90% nárůst. Kotouč č. 2 s pryskyřičným pojivem při zrnitosti D64 se v ohledu na celkový výrobní čas jeví jako vhodná alternativa ke kotoučům č. 1 a 3.



Graf č. 5 Celkové výrobní časy fréz při použití zrnitosti D126 a různých druhů pojiva

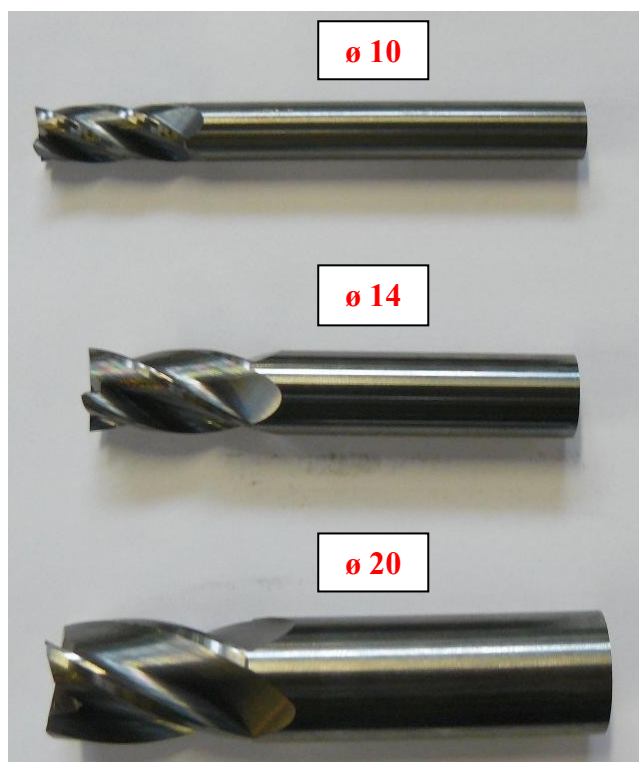
U grafu č. 5 nastává podobná situace jako v případě výroby drážky při zrnitosti D126. Pryskyřičné pojivo se dostává ohledně času na srovnatelnou úroveň s hybridním pojivem.



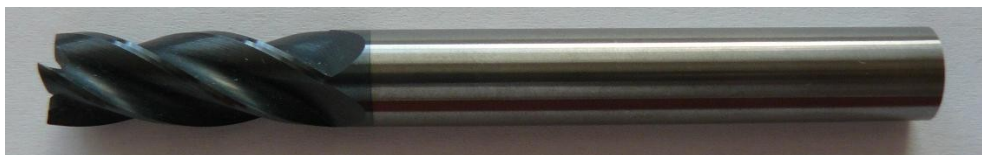
Graf č. 6 Porovnání celkových výrobních časů fréz

Graf sloužící k přehlednějšímu srovnání celkových výrobních časů pro 1 ks frézy. S hybridním pojivem jsme schopni dostat se u průměru 10 a 14 mm pod hranici 6 minut potřebnou pro výrobu, přičemž u vyššího průměru je již čas vyšší. Pryskyřičné pojivo je na tom podobně jako hybridní s tím, že s vyššími hodnotami posuvu u zrnitosti D126 se

rozdíly v čase zmenšují na rozdíl 10-20 sekund oproti hybridnímu pojivu. U průměru 10 mm se dokonce podařilo kotoučem č. 5 s pryskyřičným pojivem vyrobit frézu o 2 sekundy dříve než při použití hybridního pojiva. Bronzové pojivo se vyznačuje vyššími časy, které byly evidentní již u výroby drážky pro odvod třísek. I toto může být důvodem, proč u monolitních karbidových stopkových fréz z ekonomických důvodů existuje horní hranice průměru nástroje obvykle přibližně 25 mm.



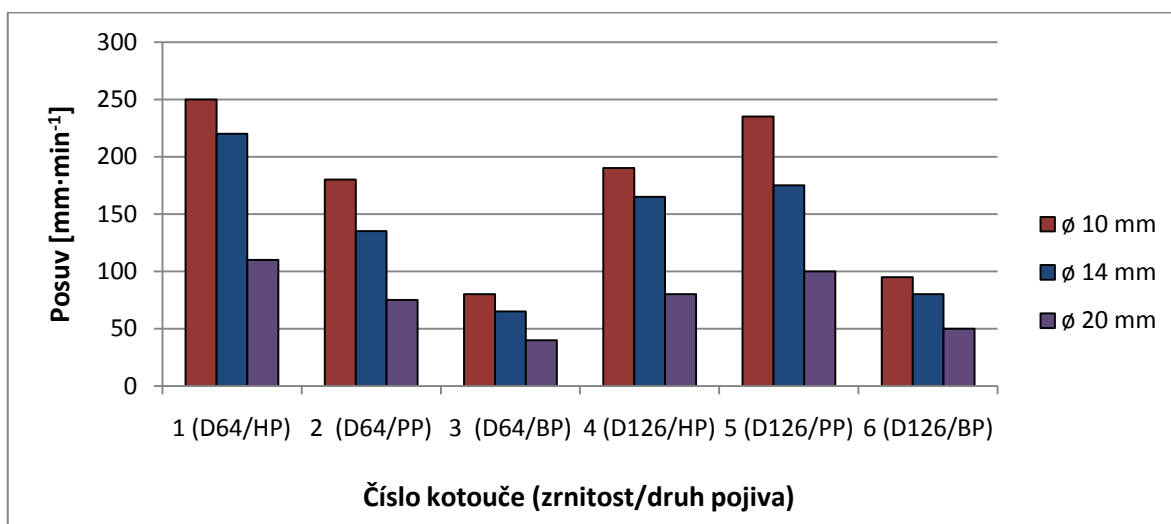
Obr. 15 Ukázka vyrobených fréz



Obr. 16 Ukázka povlakované frézy průměru 10 mm

4.4.3 Změna posuvu v závislosti na zrnitosti a pojivu

Jak jsem zmínil již v kapitole popisující postup testovací výroby, byly srovnány použité posuvy v závislosti na změně zrnitosti z D64 na D126 a použitým pojivem. Hodnoty obsažené v grafu č. 7 vychází z tabulek 5 a 6, kterou lze nalézt v přílohách.



Graf č. 7 Změna posuvu v závislosti na zrnitosti a pojivu

Při použití vyšší zrnitosti D126 muselo pro udržení kvality výroby broušením dojít ke snížení posuvu u hybridního pojiva o 25% oproti hodnotám při zrnitosti D64. Naopak proti tomu u bronzového pojiva mohlo dojít k jeho zvýšení o 20% a u pryskyřičného dokonce o 30%. Důvodem těchto změn jsou i procesy, ke kterým v návaznosti na druh použitého pojiva a posuvu dochází. Vzhledem k ochraně know-how a citlivých interních údajů firmy se ale nemohu podrobněji touto problematikou zabývat resp. ji zde rozepisovat.

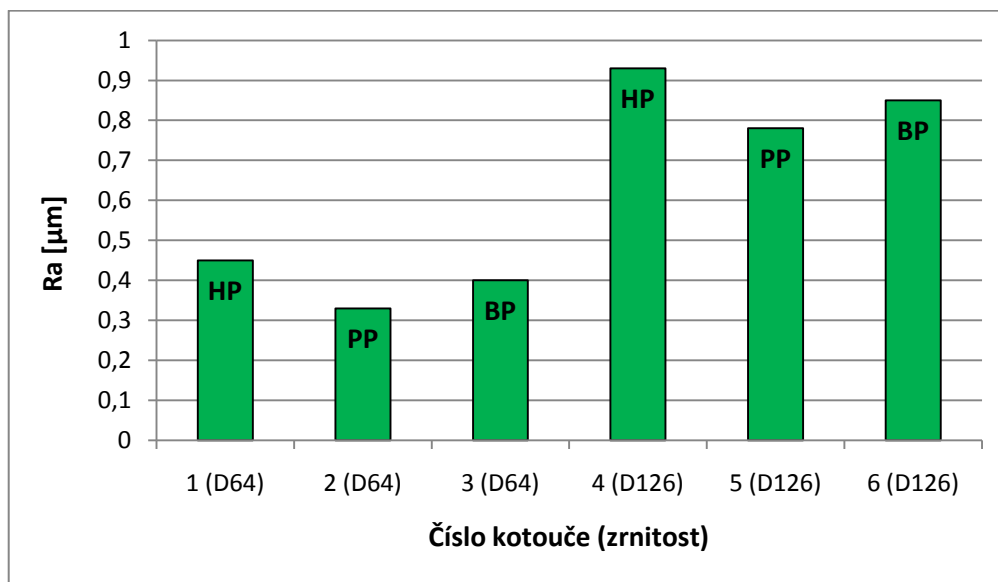
Můžeme tedy říci, že v případě výroby monolitních fréz broušením pryskyřičnému a bronzovému pojivu při vyšší zrnitosti svědčí i zvýšené posuvy, jelikož tím dojde ke snížení výrobního času, aniž by tím docházelo k nepříznivým vlivům.

4.4.4 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu byla měřena proti směru broušení na každé z hotových fréz po dokončení testovací výroby. Z tabulky 7 a 8 jsem vypočetl průměrné hodnoty Ra dosažených každým s kotoučů, které jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2 Drsnosti povrchu

Číslo kotouče	Ra [μm]
1	0,45
2	0,33
3	0,4
4	0,93
5	0,78
6	0,85



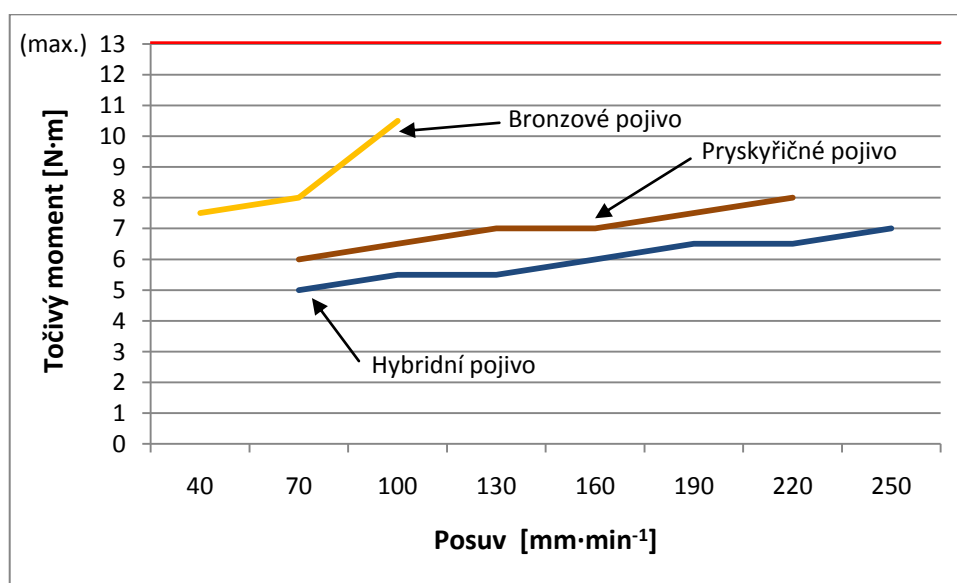
Graf č. 8 Naměřené drsnosti povrchu

Při měření drsnosti se potvrdil všeobecně známý fakt, že zrnitost brusiva je výrazně spjata s vlivem na drsnost povrchu. S vyšší zrnitostí došlo ke zhoršování obrobeneho povrchu. Při zrnitosti D64 dosáhl kotouč č. 2 obsahující pryskyřičné pojivo nižších

hodnot drsnosti oproti dvěma dalším kotoučům. Stejně to bylo i v případě zrnitosti D126, kde opět pryskyřičné pojivo (kotouč č. 5) dosáhlo nižších hodnot drsnosti povrchu. Hybridní pojivo dopadlo ve výsledcích měření nejhůře ze všech tří pojiv. U hybridního pojiva bychom mohli dosáhnout zlepšených hodnot drsností povrchů, kdybychom použili menší zrnitost např. D46, což by se ale poté odrazilo na potřebě snížení posuvu a obvodové rychlosti a tím i na delším výrobním čase broušeného nástroje.

4.4.5 Točivý moment

Další sledovanou a měřenou veličinou byl po drsnosti povrchu točivý moment, pro nějž je někdy používán v praxi i termín odpor broušení. Jeho hodnoty byly sledovány v průběhu testovací výroby v závislosti na použitých posuvech. Hodnoty odečtené z monitoru CNC brusky sloužící jako podklad pro vytvoření grafu č. 9 jsou součástí příloh jako tabulka 9.



Graf č. 9 Hodnoty krouticího momentu při použitých posuvech

Hodnoty posuvu vyobrazené na vodorovné ose grafu odpovídají použitému rozmezí při testovací výrobě monolitních fréz u jednotlivých kotoučů s daným pojivem.

U kotoučů s bronzovým pojivem byl maximální posuv okolo $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, jelikož při posuvech přesahující tuto hodnotu by došlo k pálení tvrdokovu, ničení a následnému

automatickému zastavení stroje. Kotouče s hybridním a pryskyřičným pojivem měli rozsah použitých posuvů výrazně širší.

Závislost hodnot točivého momentu na posuvu je sledována z hlediska jeho vlivu na kvalitu výroby. Při odporu např. 10 N·m (maximum použité CNC brusky je 13 N·m), který byl zaznamenán u kotoučů s bronzovým pojivem, je již tato hodnota vysoká z důvodu, že může docházet k vibracím, chvění a tím pádem k větší náročnosti broušení, která je doprovázena sníženou produktivitou a většinou nepříjemnou kvalitou finálního výrobku. Při značných vibracích dochází i k tzv. vybouchávání diamantu z vrstvy na kotouči. Jako ideální rozmezí je považováno 5-6 N·m, které je 40% resp. 50% výkonem brusky a je příhodné, přičemž těmto parametrům vyhovuje ve větší míře hybridní pojivo. U kotoučů, kde je použito hybridního a pryskyřičného pojiva lze vypořizovat stálost odporu, což jim dává schopnost samoostření.

Rozdíly v točivém momentu (odporu) mají dopad na životnost brousicích kotoučů, kdy při vyšším odporu je kotouč schopen vyrobit daleko menší počet kusů fréz do doby než musí být orovněn.

4.4.6 Chování brousicích kotoučů

V návaznosti na předcházející sledované činitele bylo v průběhu testovací výroby sledováno a zapisováno chování jednotlivých kotoučů. Zjištěné a vypořizované projevy jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3 Popis chování brousicích kotoučů

Číslo kotouče	Průměr frézy [mm]		
	10	14	20
1	Bez pálení a vibrací, tichý.	Bez pálení, ale mírně hlučné.	Bez pálení, klidný chod.
2	Mírné pálení, jemné pískání.	Mírné pálení.	Mírně hlučné.
3	Bez pálení, ale hlučné	Hlučné.	Bez pálení.
4	Bez pálení a vibrací.	Bez pálení, ale hlučné.	Mírné pálení.
5	Mírné pálení.	Mírné pálení, jemné pískání.	Mírně hlučné.
6	Hlučné.	Hlučné.	Bez pálení, ale hlučné.



Obr. 17 Povrch frézy poškozený pálením kotouče s pryskyřičným pojivem

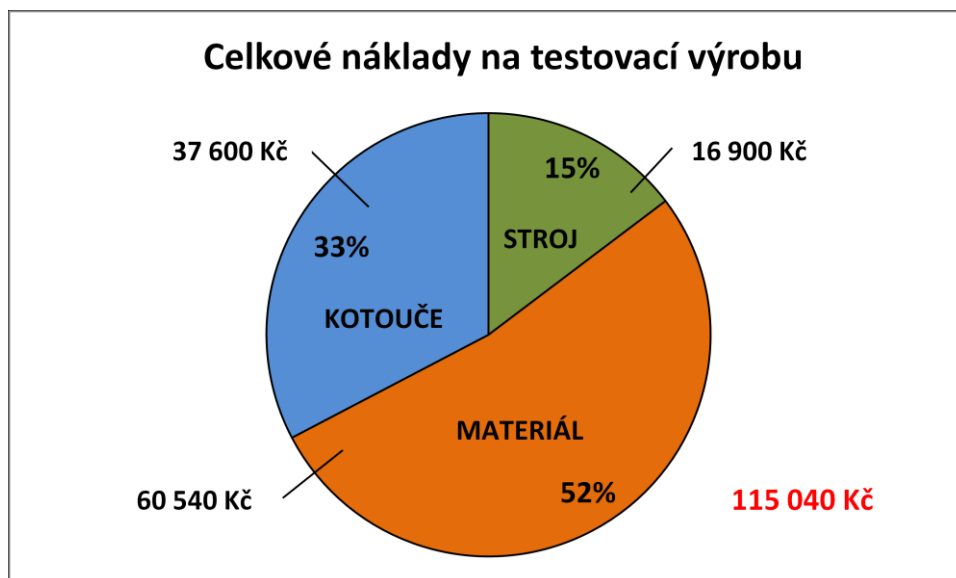
5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

S ohledem na experimentální část diplomové práce, jsem se v dalším průběhu zaměřil na ekonomické dopady či využití vycházející z dosažených výsledků testovací výroby. Stejně tak jsem zhodnotil ekonomickou náročnost celého procesu testovací výroby.

5.1 Celková finanční náročnost testovací výroby

Při celkové finanční náročnosti testovací výroby, která byla provedena v podmínkách firmy Urdiamant, s.r.o. jsem vycházel z dostupných informací, které mi byly poskytnuty v rámci dodacích listů, katalogů či již dříve provedených propočtů normovače této společnosti.

Do těchto nákladů, které tvořily konečnou finanční částku, se zahrnul CNC obráběcí stroj Walter Helitronic Mini Power resp. jeho hodinový provoz, polotovary ze slinutého karbidu dodané dle objednávky (viz. kapitola 4.2.2 Testovací materiál) a použité typy kotoučů s jednotlivými druhy pojiv. Všechny položky, jejich cena a propočet jsou v přílohách jako tabulka 10.



Graf č. 10 Celkové náklady na testovací výrobu

Náklady byly rozděleny do tří složek, jejichž podíl je procentuálně vyjádřen v grafu společně s peněžními částkami. Celkový náklad na testovací výrobu monolitních fréz broušením v podmínkách firmy Urdiamant, s.r.o. se dostal na částku 115 040 Kč. Nejnákladnější částí byla materiálová složka (slnutý karbid), zvláště pak polotovary průměru 20 mm, které tvořili více než 2/3 z celkové sumy na její použití. Přesněji se jednalo o částku 42 900 Kč, která je vysoká z důvodu problematické výroby polotovaru tohoto průměru z takového materiálu, jakým je slnutý karbid a tím vyplývající nedostatek firem zabývajících se jejich dodáváním.

Z použitých kotoučů se jako nejnákladnější dá označit typ A1A s hybridním pojivem, jehož 2 ks vyšly na 14 000 Kč, což je téměř cena za provoz CNC brusky během 13 hodin testovací výroby. Pro více informací lze nahlédnout do příloh diplomové práce, kde jsou jednotlivé položky podrobněji rozepsány.

5.2 Produktivita výroby

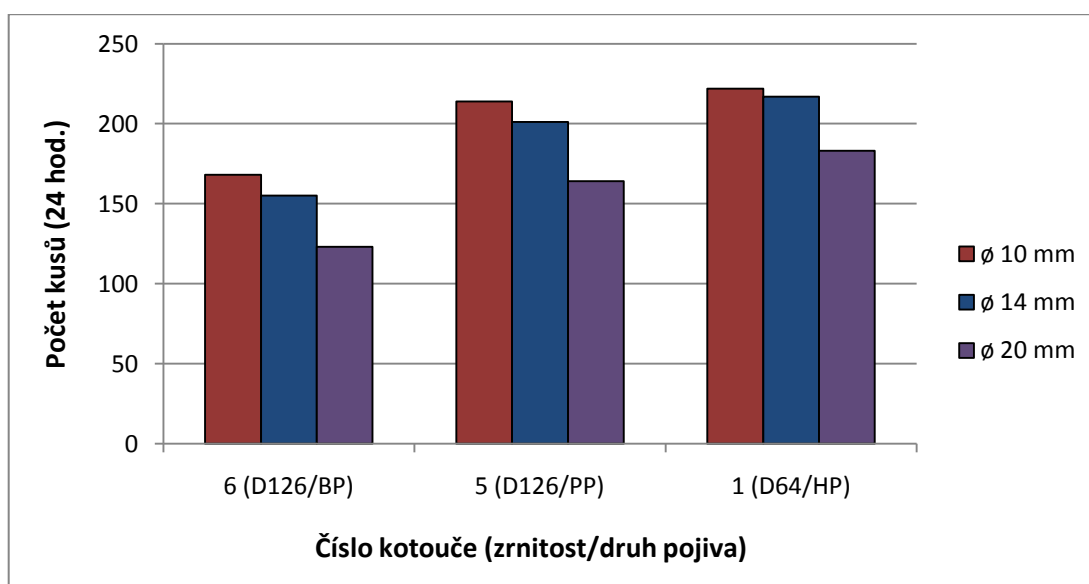
Na základě dosažených výsledků resp. časů výroby při výrobě monolitních fréz ze slnutého karbidu broušením jsem za pomoci výpočtů provedl jejich vliv na velikost produktivity a objem výroby.

5.2.1 Počet vyrobených kusů

K porovnání byly vybrány 3 kotouče, které během testovací výroby vykazovaly nejkratší výrobní časy nástrojů. Jednalo se o kotouče č. 1, 5 a 6. Výpočet produktivity byl vsazen do podmínek nepřetržitého provozu, a došlo ke spočtení počtu vyrobených kusů fréz na 1 obráběcím CNC stroji při použití daného kotouče se všemi jeho parametry. K hodnotám výsledných výrobních časů, které byly získány během testovací výroby, byla ještě připočtena 1 minuta jako vedlejší čas potřebný pro upnutí obrobku do kleštiny a nastavení režimu (parametrů) broušení na CNC brusce. Během výpočtu se uvažovalo s ideálními podmínkami výroby, kdy nedojde k neočekávaným událostem (prostojeům) jako např. technická či technologická závada, výpadek elektrického proudu...atd. Hodnoty potřebné pro výpočet počtu kusů fréz vyrobených za 24 hodin lze nalézt v přílohách jako tabulky 5 a 6.

Vzorec pro výpočet počtu vyrobených kusů fréz:

$$P_K = \frac{24 \text{ hodin [s]}}{\text{výrobní čas 1 ks frézy [s]}} \quad (18)$$



Graf č. 11 Počet vyrobených kusů během 24 hodin

Graf č. 11 slouží k vyjádření kolik kusů fréz daného průměru lze vyrobit na 1 CNC obráběcím stroji za den během nepřetržitého (24 hod.) provozu. Na základě toho grafu resp. hodnot, které se v něm vyskytují, byl poté počítán zisk z následného prodeje vyrobeného nástroje.

5.2.2 Dosažený zisk

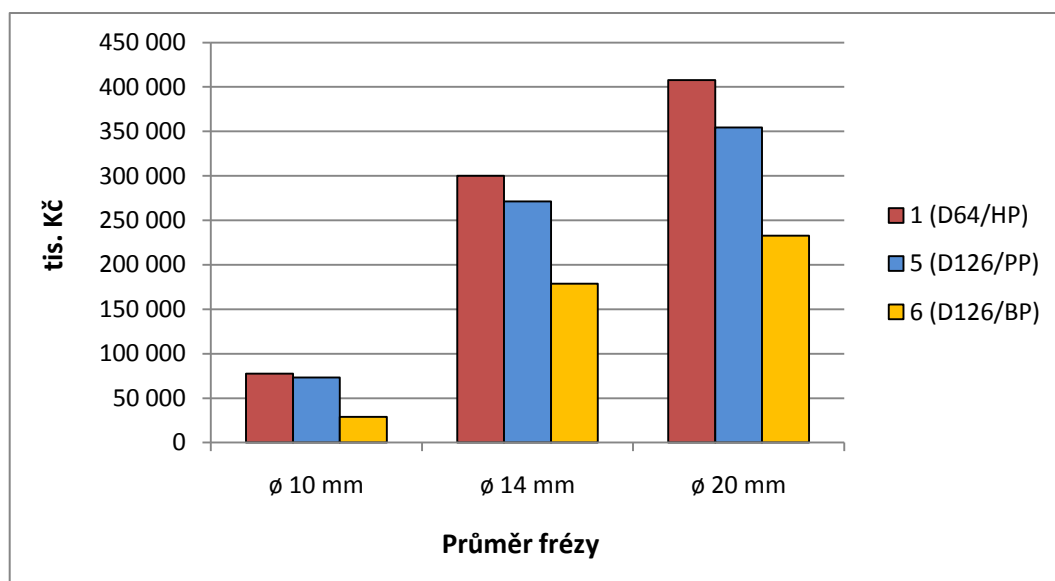
Jako závěrečné hledisko technicko-ekonomického zhodnocení jsem zvolil zisky, jako dosažený rozdíl mezi výrobní a prodejní cenou vyrobených monolitních fréz. Při jejich vyhodnocení jsem vycházel z poměru náklady/prodej.

Do nákladů byl zahrnut provoz stroje, materiál polotovarů, brousící kotouče a náklady na povlakování nástroje. Použité ceny pro propočet nákladů je potřeba označit za orientační, jelikož jejich výše se může lišit od standardních cen na základě vztahu odběratel-dodavatel. Prodejní cena jednotlivých fréz vycházela z katalogu firmy Kennametal, která je jedním z odběratelů brousících kotoučů firmy Urdiamant, s.r.o. [13]. Společnost Kennametal působí v 60 zemích celého světa a nabízí nejmodernější obráběcí nástroje [14].

Jedná se o možnost ušetření finančních prostředků, času na výrobu a provoz pro stávající či potencionální odběratele, kteří se zabývají výrobou monolitních fréz ze slinutého karbidu broušením. Tabulka 11 v přílohách slouží jako podklad pro vypočet zisku při použití vybraných kotoučů na výrobu frézy o daném průměru.

Tab. 4 Dosáhnutý zisk při použití 1 CNC stroje

Číslo kotouče	Zisk [Kč]		
	ø 10 mm	ø 14 mm	ø 20 mm
1	77 676	300 085	407 595
5	73 212	271 205	354 460
6	28 944	178 775	232 695



Graf č. 12 Dosažené zisky

V grafu jsou vyjádřeny přesné hodnoty resp. dosažené zisky, jak je uvedeno v tabulce 4. Je viditelné, že kotoučem s hybridním pojivem a zrnitostí D64 je dosaženo vyšších zisků než u ostatních dvou druhů pojiv. Dosažení nižších výrobních časů během testovací výroby s těmito kotouči v konečném důsledku sebou přináší zvýšení produktivity společně s vyššími zisky. Kotouče s pryskyřičným a bronzovým pojivem měli použitou zrnitost D126 a právě při této kombinaci společně s vhodnými parametry broušení dosahovali nižších výrobních časů a tím vyššího zisku. Ovšem tato zrnitost sebou přináší zhoršení drsnosti povrchu.

Náklady, které jsou potřeba na výrobu monolitních fréz ze slinutého karbidu, se zvyšují v souvislosti se zvětšujícím se průměrem nástroje. Nejvíce se to dotýká potřeb na materiál (polotovary), brousící kotouče a povlakování. Pokud bychom dosažené výsledky vsadili do prostředí výroby, jakou disponuje společnost Kennametal dosáhneme i vyšších zisků, jelikož ve výrobních provozech zmíněné společnosti pracuje zároveň 120 CNC obráběcích strojů Walter Helitronic Vision, přičemž pořizovací cena jednoho stroje se pohybuje okolo 25 000 000 Kč. Tyto provozy jsou řízeny automaticky, kdy lidský faktor zde plní pomocnou a kontrolní funkci.

Do těchto provozů jsou dodávány potřebný materiál či brousící kotouče i se slevou a tudíž se mohou náklady na výrobu ještě i snížit a lze tak poté vygenerovat větší zisk. V mém případě výpočtu jsem vycházel ze standardních cen bez těchto případných slev.

6 ZÁVĚR

Téma diplomové práce mělo osvětlit problematiku výroby monolitních fréz ze slinutého karbidu broušením. Zaměření se na jednotlivé faktory a doprovodné jevy, které ovlivňují jejich výrobu při předem stanovených parametrech broušení. Z dosažených experimentálních měření a na základě výsledků z průběhu testovací výroby jsem došel k několika závěrům a vyhodnocením.

Při provádění nejnáročnější operace spojené s monolitními frézami a to výrobou drážky pro odvod třísek tzv. šroubovice nástroje se při použití zrnitosti D64 a hybridního pojiva kotouče došlo ke zkrácení výrobních časů u všech průměrů fréz (10, 14 a 20 mm) oproti kotoučům s pryskyřičným či bronzovým pojivem. Toto zkrácení výrobního času drážek u monolitních fréz vyráběných broušením je zcela zásadní, jelikož poté dochází i ke snížení výrobního času celého nástroje. Srovnání rozdílů dosažených časů v případě hybridního pojiva oproti bronzovému při výrobě šroubovice fréz ukazuje, že s hybridním pojivem dosahujeme 3x rychlejších časů výroby drážky než s bronzovým pojivem. U průměru nástroje (frézy) 14 mm dokonce 4 rychleji.

S použitím vyšší zrnitosti D126 již nedošlo k takto výrazným rozdílům a kotouč s pryskyřičným pojivem dosahoval téměř stejných výrobních časů či s případnými menšími rozdíly než tomu bylo u zrnitosti D64. Bronzovému a pryskyřičnému pojivu tedy svědčila zrnitost D126, kdežto hybridnímu D64. Podíl na tom měla i změna posuvu, kdy muselo u hybridního pojiva dojít k jeho snížení a u pryskyřičného a bronzového k jeho zvýšení. U hybridního pojiva se k tomuto kroku muselo přistoupit z hlediska udržení kvality výroby broušením. Na tuto problematiku změny a jejího důvodu v závislosti na zrnitosti a druhu pojiva jsem se poté ještě zaměřil, ale vzhledem k velice citlivým a cenným údajům, které firma Urdiamant s.r.o. získala během vývoje, jsem ji již dále více nerozváděl. Bylo tomu tak z důvodu pro udržení interních informací společnosti v tajnosti.

Celkové výrobní časy monolitních fréz korespondovali s výsledky resp. časy dosaženými již při výrobě drážek pro odvod třísek. Jelikož, jak jsem již zmínil v úvodu, jedná se o nejnáročnější a nejproblematictější část frézovacího nástroje. Jestliže jsme tedy dosáhli nižších časů při výrobě drážky, odrazilo se to i na celkovém výrobním čase celé frézy. Při srovnání dosažených výsledků se zrnitostí D64 hybridní pojivo vykazovalo až o 90% nižší celkový výrobní čas než pojivo bronzové. Toto se týkalo

průměru nástroje 20 mm. Pryskyřičné pojivo se v tomto ohledu jeví jako vhodná alternativa ke kotoučům č. 1 a 3, které obsahovali právě zmíněná pojiva. Při použití zrnitosti D126 dosahovalo pryskyřičné pojivo srovnatelných celkových výrobních časů jako pojivo hybridní.

V případě srovnání získaných celkových časů během testovací výroby docházíme k závěrům, že s hybridním pojivem se bez rozdílu zrnitosti dostáváme u průměrů fréz 10 a 14 mm pod hranici 6 minut. Pryskyřičné pojivo je na tom podobně jen s tím, že vyššími hodnotami posuvu u zrnitosti D126 se rozdíly v čase zmenšují na rozdíl 10-20 sekund oproti hybridnímu pojivu. U průměru 10 mm se dokonce podařilo kotoučem č. 5 s pryskyřičným pojivem vyrobit frézu o 2 sekundy dříve než při použití hybridního pojiva. Bronzové pojivo se vyznačuje vyššími časy.

Při měření drsnosti se potvrdila vazba zrnitost brusiva-drsnost povrchu, kdy s vyšší zrnitostí docházelo ke zhoršování drsnosti povrchu. Nejnižších drsností dosáhly kotouče obsahující pryskyřičné pojivo.

Během testovací výroby byl sledován také točivý moment v závislosti na použitých posuvech. Při použití bronzového pojiva se maximální posuv pohyboval okolo $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, jelikož při vyšších posuvech by již mohlo docházet k pálení tvrdokovu a ničení CNC stroje. Pryskyřičné a hybridní pojivo měly rozsah výrazně širší dostávající se v případě hybridního pojiva až ke $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Pryskyřičné a hybridní pojivo v rozsahu těchto posuvů vykazovalo i příhodné rozmezí točivého momentu pohybující se mezi 5-6 N·m.

Jako poslední hledisko bylo sledováno i chování kotoučů a jejich vliv na výslednou kvalitu vyrobeného monolitního nástroje broušením. U pryskyřičného pojiva docházelo k mírnému pálení.

V samotném závěru bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení, které se týkalo finanční náročnosti testovací výroby pro potřeby diplomové práce. Dále poté vyhodnocení, jak se dosažené výsledky z testovací výroby promítnou do produktivity výroby a případných zisků.

Seznam použité literatury

- [1] BUDA, J.; BÉKÉS, J. *Teoretické základy obrábění kovů*. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1967. 693 s.
- [2] BUDA, J.; VASILKO, K. *Teória obrábění*. Bratislava : Alfa, 1982.
- [3] MARINESCU, I. D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W. B., INASAKI, I. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. CRC Prees, 2007. 632 s. ISBN 978-1-57444-671-5.
- [4] MASLOV, J.N. *Teorie broušení kovů*. Praha : SNTL Nakladatelství technické Literatury, 1979.
- [5] MRKVICA, M. *Přípravky a obráběcí nástroje: I. díl, Řezné nástroje*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006. 188 s. ISBN 80–7078–941–7.
- [6] ROMAN, R. Predĺženie životnosti vodouriediteľných chladiacich kvapalín. *MM Průmyslové spektrum*, 2009, č. 5, s. 56-57. ISSN 1212-2572.
- [7] URDIAMANT, s.r.o. Šumperk. *Brousicí kotouče z diamantu a kubického nitridu boru*. 2007. 80 s.
- [8] URDIAMANT, s.r.o. Šumperk. *Představení firmy*. 2005.
- [9] VASILKO, K.; BOKUČAVA, G. *Brúsenie kovových materiálov*. 1. vyd. Bratislava : Alfa, 1988. 235 s.
- [10] ZAJAC, J.; JURKO, J.; ČEP, R. *Top trendy v obrábění, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, 2006. 193 s. ISBN 80–968954–2–7.
- [11] AUDY, J. Důležitost povlakování rezných nástrojů pro ekonomické obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Prosinec 2009 [cit. 21. února 2011]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/dulezitest-povlakovani-reznych-nastroju-pro-ekonomicke-obrabeni>>
- [12] GERHARD IHLE HARTMETALLE. *Ihle* [online]. c2010, [cit. 18. dubna 2011]. Dostupné na WWW: <http://www.ihle.com/main/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=67&lang=en>
- [13] JAN HAVELKA spol. s.r.o. Archiv Katalogů Kennametal. *Jan Havelka* [online]. c2007, [cit. 2. května 2011]. Dostupné na WWW: <<http://www.jan-havelka.cz/kennametal-pdf.html>>

- [14] JAN HAVELKA spol. s.r.o. Kennametal. *Jan Havelka* [online]. c2007, [cit. 2. května 2011]. Dostupné na WWW: <<http://www.jan-havelka.cz/kennametal.html>>
- [15] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Optimalizace procesu broušení zvláště vysokými obvodovými rychlostmi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Duben 2003 [cit. 21. února 2011]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/optimalizace-procesu-brouseni-zvlaste-vysokymi-obvodovymi-rychlostmi>>
- [16] WALTER MASCHINENBAU GmbH. *Walter* [online]. [cit. 18. dubna 2011]. Dostupné na WWW: <<http://www.walter-machines.com/redwork/do.php?layoutid=403&node=2141741251&language=2>>

Seznam příloh

Tabulka 5	Parametry broušení a výrobní časy při zrnitosti D64
Tabulka 6	Parametry broušení a výrobní časy při zrnitosti D126
Tabulka 7	Hodnoty naměřených drsností při zrnitosti D64
Tabulka 8	Hodnoty naměřených drsností při zrnitosti D126
Tabulka 9	Hodnoty točivého momentu při použitých posuvech
Tabulka 10	Finanční náklady spojené s testovací výrobou
Tabulka 11	Hodnoty pro výpočet dosaženého zisku

Poděkování

Děkuji tímto prof. Dr. Ing. Josefu Brychtovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Zároveň děkuji Luděkovi Holubovi z firmy Urdiamant, s.r.o. za pomoc při experimentálním měření a informace týkající se řešené problematiky.